

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla

Analysis of Forming Forces by Hot Bending of Steel Tubes

Student:

Bc. Jiří Smrček

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

OSTRAVA 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Smrček**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla**
Analysis of Forming Forces by Hot Bending of Steel Tubes

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií výroby trubkových oblouků velkých rozměrů.
2. Analýza tepelně mechanických parametrů ohybových procesů.
3. Stanovení základních vektorů sil působících v ohybovém zařízení
4. Provedení analýzy pro materiálové reprezentanty různých legovacích konceptů.
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
STANGE, R. *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2012.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18.5.2012



podpis

Bc. Jiří Smrček

Klubovní 89, Postřelmov 789 69

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SMRČEK, J. *Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 54 s. Vedoucí práce: Hrubý, J.

Diplomová práce se zabývá analýzou tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla. V úvodní části jsou představeny používané technologie ohýbání trubek. V další fázi je s pomocí software QForm 5.1 provedena simulace procesu ohýbání ocelových trubek pomocí ohýbací kladky s využitím indukčního ohřevu. Finální část obsahuje rozbor dosažených výsledků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SMRČEK, J. *Analysis of Forming Forces by Hot Bending of Steel Tubes*. Ostrava : Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, 2012, 54 p. Thesis head: Hrubý, J.

This master thesis analyses forming forces of steel tubes by hot bending. The introduction part covers common tube bending technologies. In the next phase is, by Qform 5.1 software, performed simulation of the bending process of steel tubes by bending roller using induction heating. The final part contains an analysis of reached results.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	11
1 Tváření kovů	12
1.1 Tvářitelnost kovů.....	13
1.2 Základní přetvárný odpor.....	13
1.3 Vliv tváření na krystalickou strukturu a vlastnosti kovu	14
2 Technologie ohýbání ocelových trubek.....	15
2.1 Teorie ohýbání a hlavní děje při ohýbání trubek	16
2.1.1 Napjatostní stav při ohybu	16
2.1.2 Příčný průřez a jeho změny	17
2.1.3 Změna tloušťky stěn ohýbaných trubek.....	19
2.1.4 Zborcení vnitřní stěny ohýbané trubky	20
2.2 Ohýbání trubek za tepla.....	21
2.2.1 Středofrekvenční indukční ohřev.....	22
2.2.2 Ohýbací stroje s indukčním ohřevem.....	24
2.2.3 Popis práce na ohýbacím stroji s indukčním ohřevem	25
3 Výpočet a simulace procesu zkružování	27
3.1 Charakteristika materiálových reprezentantů	28
3.2 Specifikace parametrů procesu zkružování.....	30
3.2.1 Technologické parametry	31
3.2.2 Délka ramene kladky a nastavení kladek.....	32
3.2.3 Rychlost posuvu trubky a teplota ohřevu materiálu	34
3.3 Jednotlivé fáze MKP výpočtu	35
3.3.1 Tvorba geometrického modelu	35
3.3.2 Tvorba sítě elementů v programu QForm	36
3.3.3 Definice okrajových podmínek.....	36
3.4 Vlastní výpočet.....	38
3.5 Zpracování výsledků simulace.....	40

4 Výsledky simulace procesu zkružování.....	40
4.1 Distribuce teplotního pole	41
4.2 Efektivní deformace	43
4.3 Střední napětí.....	45
4.4 Deformace ohýbané trubky.....	46
4.5 Zatížení jednotlivých kladek.....	47
5 Zhodnocení dosažených výsledků	52
6 Použitá literatura	53

Seznam použitých značek a symbolů

MKP	metoda konečných prvků	
A	tažnost	[%]
a_1	vzdálenost induktoru a vodící kladky	[mm]
a_2	vzdálenost ohýbací a vodící kladky	[mm]
D	průměr ohýbané trubky	[mm]
D_p	průměr trubky měřený ve směru kolmém na směr poloměru ohybu trubky	[mm]
D_r	průměr trubky měřený ve směru poloměru ohybu trubky	[mm]
D_Y	vnější průměr trubky měřený ve směru osy Y	[mm]
D_Z	vnější průměr trubky měřený ve směru osy Z	[mm]
E	modul pružnosti v tahu materiálu ohýbané trubky	[MPa]
F_o	přítlačná síla ohýbací kladky	[N]
F_t	síla tlačného zařízení	[N]
F_v	přítlačná síla vodící kladky	[N]
F_X	zatížení jednotlivé části ohýbacího stroje působící v ose X	[N]
F_Y	zatížení jednotlivé části ohýbacího stroje působící v ose Y	[N]
F_Z	zatížení jednotlivé části ohýbacího stroje působící v ose Z	[N]
I	moment setrvačnosti ohýbané trubky	[mm ⁴]

k	materiálový koeficient minimálního poloměru	[mm]
$KCU\ 3$	vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
K_o	poměrná ovalita	[%]
L	délka ramene ohýbací kladky	[mm]
M_o	ohybový moment	[Nm]
n	exponent zpevnění materiálu	[-]
R	poloměr ohybu trubky	[mm]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	pevnost v tahu	[MPa]
R_{min}	minimální poloměr ohybu	[mm]
R_n	nastavený poloměr ohybu pro dosažení požadovaného poloměru R	[mm]
R_p	smluvní mez kluzu	[MPa]
r_2	nejmenší poloměr ohýbací kladky	[mm]
S	střed trubky	[-]
s	tloušťka stěny ohýbané trubky	[mm]
s_1	střednice tloušťky stěny trubky na vnějším poloměru ohybu	[mm]
s_2	střednice tloušťky stěny trubky na vnitřním poloměru ohybu	[mm]
\check{s}	pruh ohřevu trubky	[mm]

\dot{s}_1	změna šířky ohřátého pruhu trubky na vnějším poloměru ohybu	[mm]
\dot{s}_2	změna šířky ohřátého pruhu trubky na vnitřním poloměru ohybu	[mm]
T	teplota ohřevu materiálu	[°C]
T_T	teplota tání	[°K]
Δt	ztenčení stěny	[%]
t_0	původní tloušťka stěny	[mm]
t_{min}	minimální tloušťka stěny	[mm]
v	rychlost posuvu trubky	[mm·min ⁻¹]
W_0	průřezový modul v ohybu	[mm ³]
y	hodnota posunutí ohybové kladky	[mm]
α	teplotní součinitel roztažnosti	[K ⁻¹]
λ	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
σ_p	přetvárný odpor materiálu trubky odpovídající teplotě a rychlosti plastické deformace	[MPa]
σ_z	základní přetvárný odpor	[MPa]
φ	logaritmická deformace	[-]

Úvod

Ocelové trubky nalézají uplatnění skoro ve všech průmyslových odvětvích a to nejen jako konstrukční materiál, ale zejména jako polotovar pro výrobu různých potrubí. K jejich širokému konstrukčnímu nasazení přispívá skutečnost, že ocelové trubky mají oproti ostatním válcovaným profilům při stejné hmotnosti největší průřezový modul v krutu. Velice výhodné se jeví i jejich použití při namáhání konstrukce ohybem a vzpěrem [5].

Trubky proto našly své uplatnění v energetickém, chemickém, automobilovém, leteckém, stavebním i potravinářském průmyslu. Toto pestré využití vyžaduje velký sortiment vyráběných trubek zejména s ohledem na jejich rozměry a požadovanou jakost materiálů.

V průmyslových provozech jsou ocelové trubky vystaveny mechanickému namáhání vnějšími silami, mezi které patří především tlak, tah, ohyb, smyk, krut, ale také jejich různé kombinace. Dále mohou být namáhány vnějším i vnitřním přetlakem a také jsou vystaveny chemickému a tepelnému zatížení [5].

Všechny tyto vlivy vymezují hlavní požadavky na trubkové konstrukce:

- Pevnost a stálost tvaru v rozmezí pružných deformací při působení vnějších sil a momentů za normální, nízké či vysoké teploty,
- pevnost a stálost tvaru za shora uvedených podmínek za současného působení chemických vlivů,
- odolnost proti otěru,
- odolnost proti korozivním a jiným chemickým vlivům,
- tepelná a elektrická vodivost,
- různé technologické požadavky – pružnost, velká tvárnost, obrobitelnost [5].

1 Tváření kovů

Mezi hlavní způsoby výroby strojírenských výrobků, součástí a vyráběných polotovarů patří tváření kovů [3]. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí srovnatelného s mezí kluzu daného materiálu. Tento děj je doprovázen strukturálními a fyzikálními změnami v materiálu, jenž v konečném důsledku ovlivňuje mechanické vlastnosti tvářeného materiálu. Jedná se o výrobní proces, při kterém dochází ke změně tvaru výrobku v důsledku působení vnějších sil bez vzniku třísek [2].

Tvářecí procesy se využívají zejména pro svoji vysokou produktivitu práce spojenou s velmi dobrou rozměrovou přesností a vysokou využitelností tvářeného materiálu. Rychlost výroby je mnohem větší než při jiných způsobech. Další výhodou je vhodný průběh vláken, který přispívá ke zvýšení pevnosti a spolehlivosti strojních součástí a také možnost zařazení tvářecích technologií do výrobních linek, které lze plně automatizovat. Jejich velkou nevýhodou je rozměrové omezení výrobku a vysoká cena tvářecích nástrojů a strojního vybavení.

Technologické tvářecí procesy lze rozdělit na dva základní výrobní způsoby:

- 1) **Tváření objemové** – děj, při němž se dosahuje změny tvaru v celém objemu značným přemísťováním materiálu s podstatnou změnou průřezu tvářeného polotovaru.
- 2) **Tváření plošné** – děj, při němž nedochází k výraznějším změnám průřezu výchozího materiálu, jako je například tváření plechů.

Tyto tvářecí procesy lze dále rozdělit podle teploty, tepelného efektu, stupně dosažené deformace a podle působení vnějších sil [2].

1.1 Tvářitelnost kovů

Základním měřítkem tvářitelnosti kovů je velikost přetvoření, které kov snese, aniž by se porušila jeho soudržnost. Příčinou tohoto plastického přetvoření je zejména skluz jednotlivých krystalů v rovině kluzu nejhustěji obsazené atomy. Tyto skluzy se uskutečňují pohybem dislokací v mřížce kovu, kdy postupným přesunem jednotlivých atomů dochází k posunutí určité části krystalu kovu. Tvářitelnost kovu závisí na stavu prostorové napjatosti tvářeného kovu a také na jeho teplotě, kdy rostoucí teplotu doprovází výrazné zlepšení tvářitelnosti kovu [4].

Tvářitelnost kovů je tedy schopnost tvářeného objektu se plasticky deformovat za obecných podmínek tváření bez porušení celistvosti materiálu [1].

Tvářitelnost kovů lze popsat pomocí dvou definic:

- Tvářitelnost kovů je velikost deformace, kterou kov může snést bez částečného nebo úplného porušení celistvosti při dané teplotě a rychlosti deformace [1].
- Tvářitelnost kovů je stupeň deformace při jednotlivých procesech zpracování kovů tvářením, který nevyvolává na konečném výlisku nežádoucí jevy [1].

1.2 Základní přetvárný odpor

Tlak, jímž musíme působit na plošnou jednotku stlačovaného kovu, aby došlo k plastickému přetvoření, nazýváme jako základní přetvárný odpor σ_z . Zjišťování přetvárného odporu je prováděno za přesně stanoveného stavu napjatosti, rychlosti deformace a při konstantní teplotě. Přetvárný odpor je závislý na mnoha faktorech používaného materiálu, jako je chemické složení materiálu, jeho struktury, teploty, stupně a rychlosti deformace a stavu napjatosti. Při tváření za studena je hlavní proměnnou stupeň deformace. Oproti tomu při tváření za tepla je řídicí proměnnou rychlost deformace a teplota.

1.3 Vliv tváření na krystalickou strukturu a vlastnosti kovu

Způsob, jímž se obnovuje krystalická mřížka kovu tvářeného za studena, se nazývá rekrytalizace. Tento děj probíhá při ohřevu na rekrytalizační teplotu, což je asi 0,4 jejich tavicí teploty T_T ve dvou na sebe navazujících fázích. Při nízkých teplotách (pod T_T) probíhá zotavení, kdy se mění mechanické a fyzikální vlastnosti základního materiálu a při teplotě nad T_T nastává vlastní rekrytalizační proces, při němž je deformované zrno nahrazeno zrnem novým. Tuto fázi provází výrazná změna mechanických vlastností i velikostí zrna [4], [2].

Podle vztahu teploty tvářeného materiálu k teplotě rekrytalizace se tvářecí technologie rozdělují:

- 1) Tváření za studena** - provádí se pod rekrytalizační teplotou a v průběhu tvářecího procesu dochází ke zpevňování materiálu. Zpevněním se zvyšují hodnoty meze pevnosti R_m a meze kluzu R_p a klesá tažnost A . Primární krystaly kovu se zjemňují a protahují se ve směru tváření. Výhodou této metody je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch, který není zanesen okujemi a zlepšování mechanických vlastností materiálu zpevněním. Velkou nevýhodou je ovšem potřeba použití velkých tvářecích sil a omezená tvárnost materiálu.
- 2) Tváření za tepla** - probíhá nad rekrytalizační teplotou při vysokých rekrytalizačních rychlostech. Při tomto procesu nastává v průběhu tváření rekrytalizace a tím pádem dochází k nárůstu velikosti zrn materiálu. Nedochozí zde ke zpevnění materiálu a k vlastnímu procesu stačí vyvinout až desetkrát menší tvářecí síly, než u tváření za studena. Povrch výrobku je ale znečištěn okujemi a také výrazně hrubne zrno vlastního materiálu.

2 Technologie ohýbání ocelových trubek

Ohýbání patří mezi procesy plošného tváření. Jedná se o děj vyvolaný působením momentů vnějších sil, při němž dochází v místě ohybu k natáčení průřezů kolmých k rovině momentu kolem osy ležící mimo namáhaný materiál.

V průmyslových aplikacích lze nalézt požadavky na nejrůznější tvary ohybů a samotné ohyby pak lze z hlediska prostorové geometrie rozdělit jako [5]:

- Rovinné ohyby,
- ohyby ležící v několika rovinách,
- prostorové ohyby.

Pro každý geometrický tvar lze využít více technologických způsobů provedení vlastního ohybu a volba této metody závisí zejména na tvářitelnosti používané trubky, na jejich rozměrech a technologických omezeních zvoleného způsobu zhotovení ohybu. V průběhu rozvoje strojírenského průmyslu bylo vynalezeno velké množství různých technologických metod ohýbání trubek. Vzhledem k tomu, že při vlastním provádění ohybu trubek za tepla i za studena lze využít nejrůznějších kombinací různých působících momentů a přitlačných sil, nelze provést ucelený výčet všech možných způsobů ohýbání.



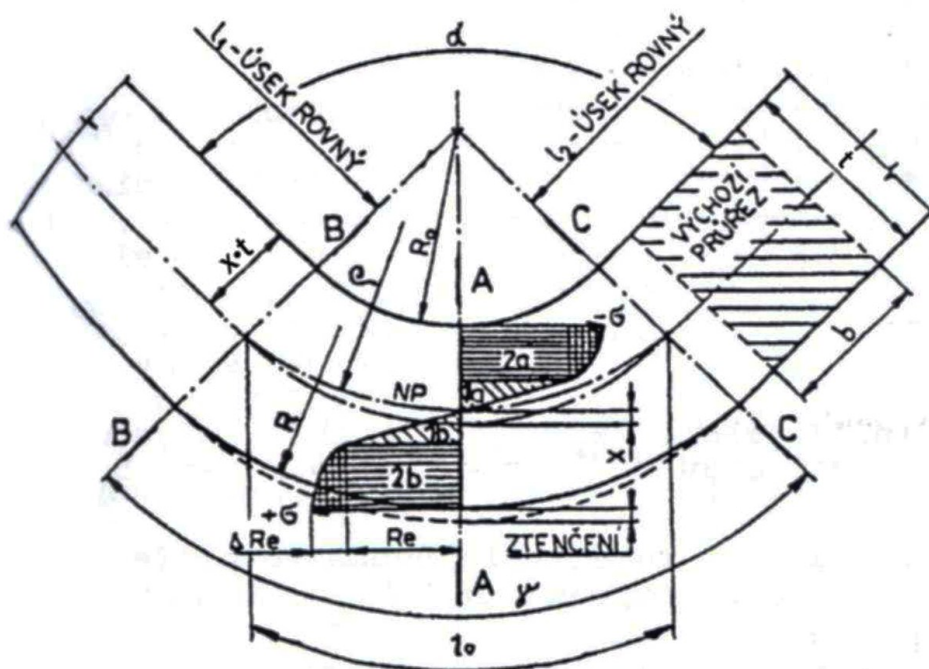
Obr. 1 Ohýbané silnostěnné trubky [8]

2.1 Teorie ohýbání a hlavní děje při ohýbání trubek

Ve strojírenské výrobě patří ohýbání k velice využívaným technologickým operacím, při níž se výchozí materiál deformuje napětím vzniklým od působící ohybové síly. Samotný proces je realizován pomocí ohýbacích nástrojů a strojů a to jak za studena (při teplotách výrazně nižších než je rekrystalizační teplota) tak i za tepla. Ohýbání za tepla je využíváno zejména, pokud má polotovar velký průřez, vyšší mez pevnosti či je křehký nebo tvrdý.

2.1.1 Napjatostní stav při ohybu

Během ohýbání dochází v místě ohybu k nehomogenní pružně plastické deformaci. Na její velikost má vliv chemické složení i mechanické vlastnosti ohýbaného materiálu v místě ohybu, orientace ohybu směrem ke směru vláken výchozího materiálu, poloměr požadovaného ohybu a velikost ohybových sil. Samotné přetvoření probíhá v místě maximálního ohybového momentu [10],[11].



Obr. 2 Schematický popis a zobrazení rozložení napětí v trubce zatížené ohybovým momentem [10]

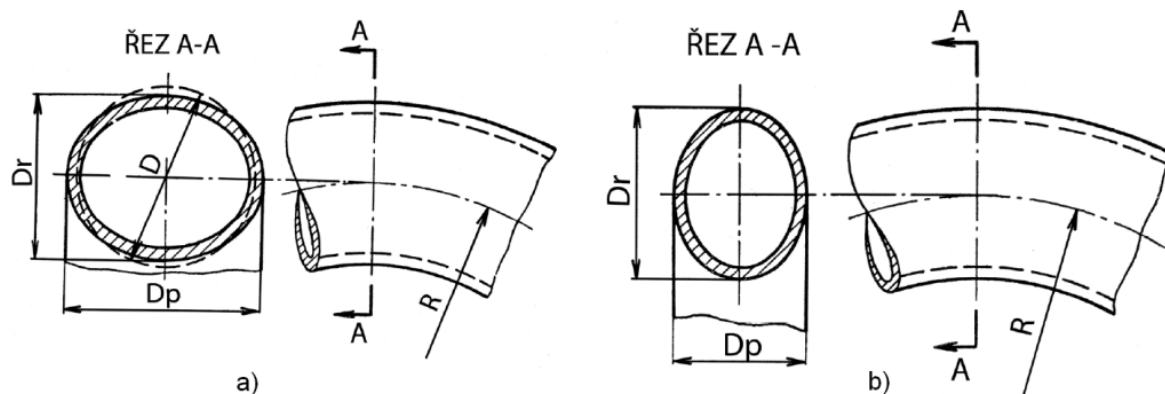
Při zatěžování trubky ohybovým momentem dochází nejprve ke vzniku elastického ohybu, který je charakteristický lineárním rozložením napětí (obr. 2 - oblast 1a a 1b). Na vnější straně ohýbaného poloměru jsou krajní vlákna namáhána maximálním tahovým napětím $-\sigma$ a na vnitřní straně trubky jsou naopak namáhána maximálním tlakovým napětím $+\sigma$. Tyto napětí se směrem k neutrální ose snižují až k nule. Při pružném napětí tato neutrální osa nemění svoji pozici a je totožná s osou ohýbané trubky. Při dalším nárůstu zatížení překročí napětí v krajních vláknech napětí na mezi kluzu R_e a vyvolá trvalé prodloužení na vnější straně ohybu a na vnitřní straně plastické stlačování. Průběh tohoto napětí již není lineární (viz obr. 2 – oblast 2a a 2b). Tento děj způsobuje nerovnoměrné rozložení materiálu v příčném řezu ohýbané trubky. Na vnitřní straně ohýbaného poloměru dochází k nárůstu tloušťky stěny ohýbané trubky, na vnějším k jejímu zeštíhlení. V původní neutrální ose trubky, kde bylo při elastické deformaci napětí nulové, začíná narůstat tahové napětí a vlákno bez napětí se začíná postupně posunovat směrem ke středu ohybového poloměru. Poloha tohoto neovlivněného vlákna je silně ovlivňována použitou metodou ohýbání, a to zejména pokud působí při ohybu kromě ohybového momentu na ohýbanou trubku další tlaková či tahová zatížení.

2.1.2 Příčný průřez a jeho změny

Během ohýbání dochází vlivem působení ohýbacích sil ke změně příčného průřezu ohýbaného materiálu. Tento tvar se mění nejčastěji tak, že dochází ke zvětšení hodnoty D_p ve směru kolmém na směr poloměru ohybu trubky a ke zmenšení hodnoty D_r ve směru poloměru ohybu.

Tento děj se nazývá zploštění kruhového průřezu, je zobrazen na obr. 3a a platí pro něj následující vztah:

$$\frac{D_r}{D_p} < 1 \quad [-] \quad (2.1)$$



Obr. 3 Zploštělý (a) a vydutý (b) tvar příčného průřezu trubky

Opačný děj je nazýván jako vydutá změna kruhového průřezu (viz obr. 3b) a nastane v případě, že:

$$\frac{D_r}{D_p} > 1 \quad [-] \quad (2.2)$$

Hodnota změn příčného průřezu trubky po ohybu se vyjadřuje hodnotou poměrné ovality K_o . Ta se vyjadřuje v procentech, může nabývat hodnot různých od nuly, která představuje ideálně kruhový průřez a vypočítá se ze vztahu:

$$K_o = \frac{D_p - D_r}{D} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.3)$$

K_o – poměrná ovalita [%],

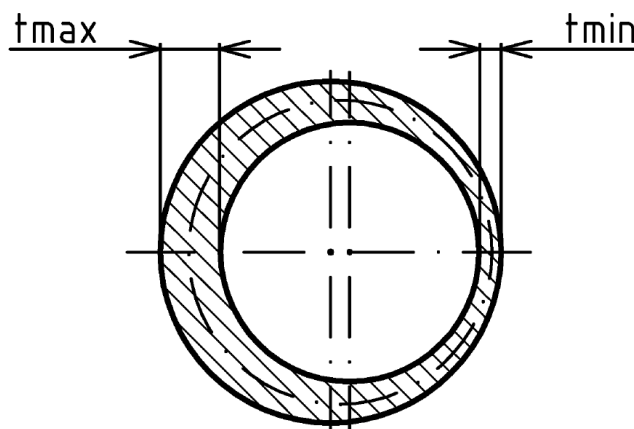
D_p – hodnota průměru trubky ve směru kolmém na poloměru ohybu [mm],

D_r – hodnota průměru trubky ve směru poloměru ohybu [mm],

D – výchozí průměr trubky [mm].

2.1.3 Změna tloušťky stěn ohýbaných trubek

Dalším nežádoucím jevem při ohýbání trubek je změna tloušťky vlastních stěn trubky na vnitřním a vnějším poloměru ohybu. Působením tlakového napětí dochází v oblasti vnitřního poloměru ohybu k nárůstu tloušťky stěny ohýbané trubky. Na jejím vnějším ohýbaném poloměru působí napětí tahové, jenž má za následek ztenčení této stěny a může vést ke vzniku trhlin ve stěně ohýbané trubky.



Obr. 4 Ztenčení tloušťky stěn ohýbané trubky

Dovolená hodnota tohoto ztenčení byla smluvně stanovena jako 25 % a vlastní hodnotu ztenčení Δt lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$\Delta t = \left(1 - \frac{t_{min}}{t_0}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

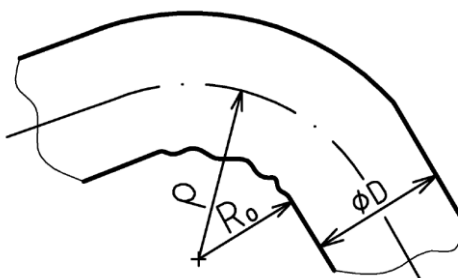
Δt – ztenčení stěny [%],

t_{min} – minimální tloušťka stěny [mm],

t_0 – původní tloušťka stěny [mm].

2.1.4 Zborcení vnitřní stěny ohýbané trubky

Při ohýbání ocelových trubek může v oblasti vnitřního poloměru ohýbané trubky vlivem ztráty stability ve stěně výchozího materiálu vzniknout na této ploše jisté deformační zvrásnění. U konstrukčních dílců a polotovarů, které jsou v provozu vystaveny namáhání vysokými změnami provozních tlaků či velkými vibracemi, je tento jev pojmenovaný jako zvlnění stěny trubky nežádoucí (viz obr. 5).



Obr. 5 Schematické znázornění zvlnění stěny trubky

Tyto deformace se dají v určitých mezích potlačit použitím vhodných výplní či vyhlazovače, které stabilizují kruhový průřez a zabraňují vzniku vln na vnitřním ohýbaném poloměru:

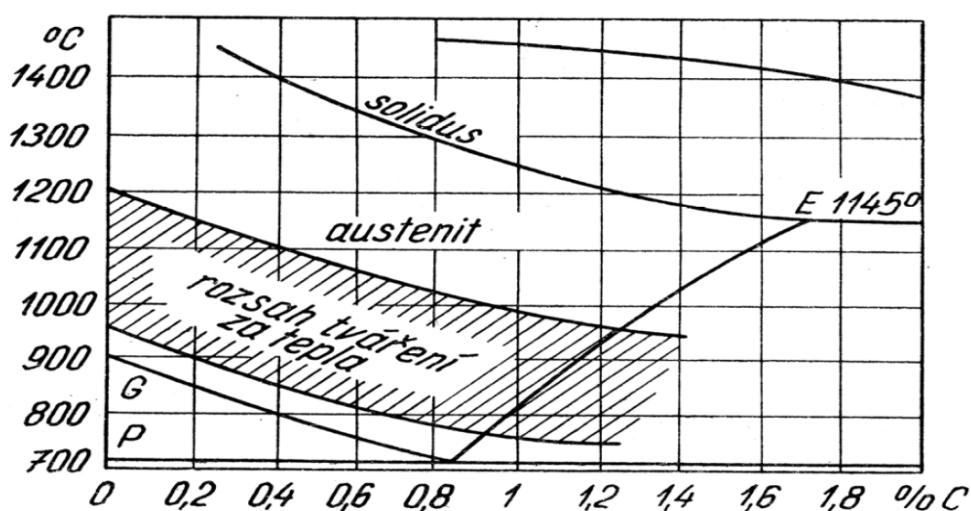
- Tuhá plnidla – hodí se na ohýbání krátkých trubek s větším průměrem a jejich výhodou je snadná odstranitelnost výplachem horkou vodou. Nevýhodná je ale jejich křehkost (kalafuna, dusičnan vápenatý, lehce tavitelné slitiny).
- Tekutá plnidla – vhodná pro všechny průměry ručně ohýbaných trubek. Kapalina se snadno odstraňuje z trubky, ale konce musí být opatřeny šroubením.
- Sypká plnidla – tyto se používají pro ohýbání za tepla a typickým představitelem je sklářský písek. Nevýhodou je složitější a časově náročnější postup vlastního ohýbání a vyšší kvalifikace pracovníků.
- Elastická plnidla – využívaná pro kombinaci pevnosti a pružnosti.
- Mechanické výplně – nejčastěji se využívají různě tvarované trny, pružiny a ohebné segmentové vložky.

2.2 Ohýbání trubek za tepla

Vzhledem k vyšší ekonomické náročnosti, která je u ohýbání za tepla způsobena zvýšenou časovou náročností plynoucí z potřeby ohřevu materiálu či aplikace výplně trubek a vyšších režijních nákladů způsobených zejména spotřebou tepelné energie potřebné pro ohřev, se ohýbání trubek za tepla aplikuje především z následujících důvodů:

- Ohyb trubek velkých průměrů, při nichž by při tváření za studena bylo potřeba velkých, silně dimenzovaných strojů,
- ohýbání houževnatých materiálů, u nichž by při tváření za studena docházelo k vyčerpání plasticity či překročení tažnosti ohýbaného materiálu.

Během tvářecího procesu za tepla velmi výrazným způsobem klesá pevnost používaného materiálu a tento děj způsobí také snížení potřebné ohýbací síly. Vlastní teplota ohřevu potřebná pro tvářecí proces závisí na chemickém složení oceli a obsahu uhlíku. Tato tvářecí teplota se musí pohybovat přibližně $100 \div 200^\circ\text{C}$ pod křivkou solidu vyjádřené v rovnovážném diagramu Fe-C a při vlastním tvářecím procesu nesmí dojít k jejímu poklesu pod dolní teplotní mez. Na obrázku č. 6 je zobrazen rozsah teplot použitelných pro tváření za tepla u uhlíkových ocelí.



Obr. 6 Rozsah využitelných tvářecích teplot uhlíkových ocelí [17]

2.2.1 Středofrekvenční indukční ohřev

Nasazení indukčního ohřevu pro ohýbání trubek za tepla přináší celou řadu výhod, z nich největší je možnost velmi dobré regulace tvářecí teploty a také to, že zahřátí velmi úzkého pruhu trubky snižuje nebezpečí vzniku zvlnění po ohybu.

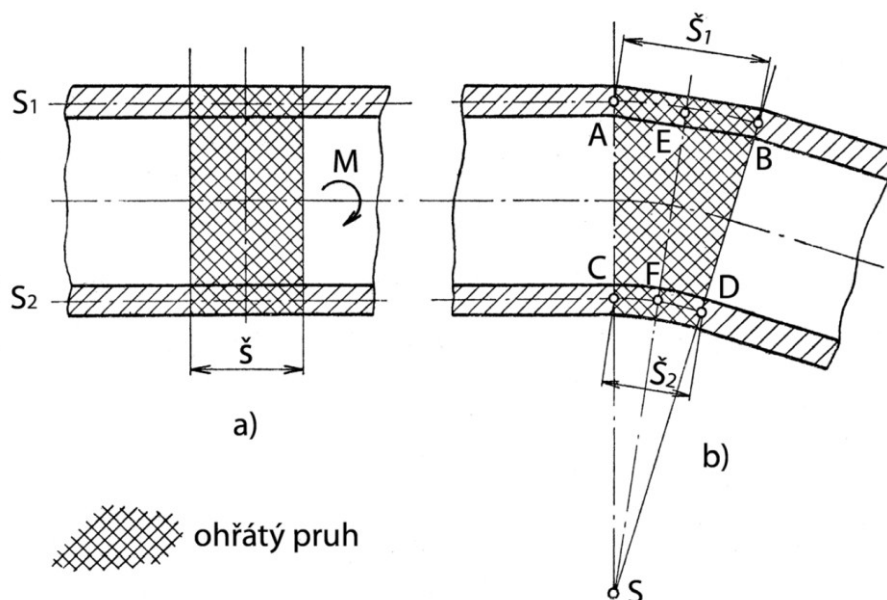


Obr. 7 Detail cívky indukčního ohřevu se snímačem teploty [8]

Vlastní ohřev je prováděn pomocí speciálního prstence, tvořeného elektrickou cívkou, jehož středem prochází ohýbaný materiál. Aby nedocházelo k narušení povrchové, či vnitřní jakosti materiálu, musí být tento děj co nejkratší. Proto je následně za ohřevem aplikováno chlazení, jež bývá provedeno pomocí vodní

sprchy či proudu vzduchu a podporuje vznik ohybu mezi pásmy ohřevu a chlazení. Studený materiál před a za tímto pásmem navíc zamezuje vybočení stěny trubky a vzniku zvlnění.

Na obrázku č. 8 je znázorněn průběh ohýbání při využití indukčního ohřevu. V místě počátku ohybu je materiál ohříván v šířce \check{s} na požadovanou tvářecí teplotu. V okamžiku, kdy je této teploty dosaženo, je vyvinut potřebný ohybový moment M , který trubku ohýbá kolem středu S . Vliv tohoto ohybového momentu a výsledné deformace způsobí změnu rozměrů tohoto ohřátého pásma. Na vnějším i vnitřním poloměru dojde ke změně jeho šířky \check{s} na hodnotu \check{s}_1 , potažmo \check{s}_2 . Také dochází na vnějším poloměru ke ztenčení stěny trubky a na vnitřním poloměru ohybu následkem pětchování k jejímu zvětšení. Vlivem působících sil dojde k vysunutí střednice tloušťky stěny na vnitřním poloměru ohybu s_2 směrem k ose trubky. Střednice s_1 na vnějším poloměru se pohybuje přímočaře mezi body A a B . Vzdálenost mezi body EF je menší než mezi body AC a tudíž se ve výsledném procesu tato deformace projevuje jako nechtěná ovalita. Na tento parametr má tedy hlavní vliv šířka ohřátého pásma a je vhodné tento pruh volit co možná nejmenší.



Obr. 8 Průběh tváření trubky při indukčním ohřevu (a – stav před ohýbáním, b – změny v materiálu trubky po provedeném ohybu)

2.2.2 Ohýbací stroje s indukčním ohřevem

Pro ohýbání trubek velkých rozměrů za tepla s indukčním středofrekvenčním ohřevem byly vyrobeny speciální stroje. Tyto moderní stroje nám umožňují nejen elektronické sledování celého procesu ohýbání, ale i pořízení záznamu ohýbacího procesu v elektronické podobě, který se dá využít pro pozdější analýzy.

Nasazením CNC řízení jsou tyto stroje schopny zhotovit i složené a vícenásobné prostorové ohyby z jedné trubky. A díky tomu je možné některé potrubní isometrie vyrobit z jednoho kusu trubky při velmi vysoké tvarové přesnosti a minimalizaci počtu svarů.

Tyto stroje umožňují v závislosti na typu stroje volbu poloměru ohybu od 200 mm do 5100 mm. Ohyby lze vyrábět z bezešvých nebo podélně svařovaných uhlíkových, legovaných i nerezových ocelových trubek. Tloušťka stěny ohýbané trubky může být v závislosti na parametrech ohýbání až 105 mm.

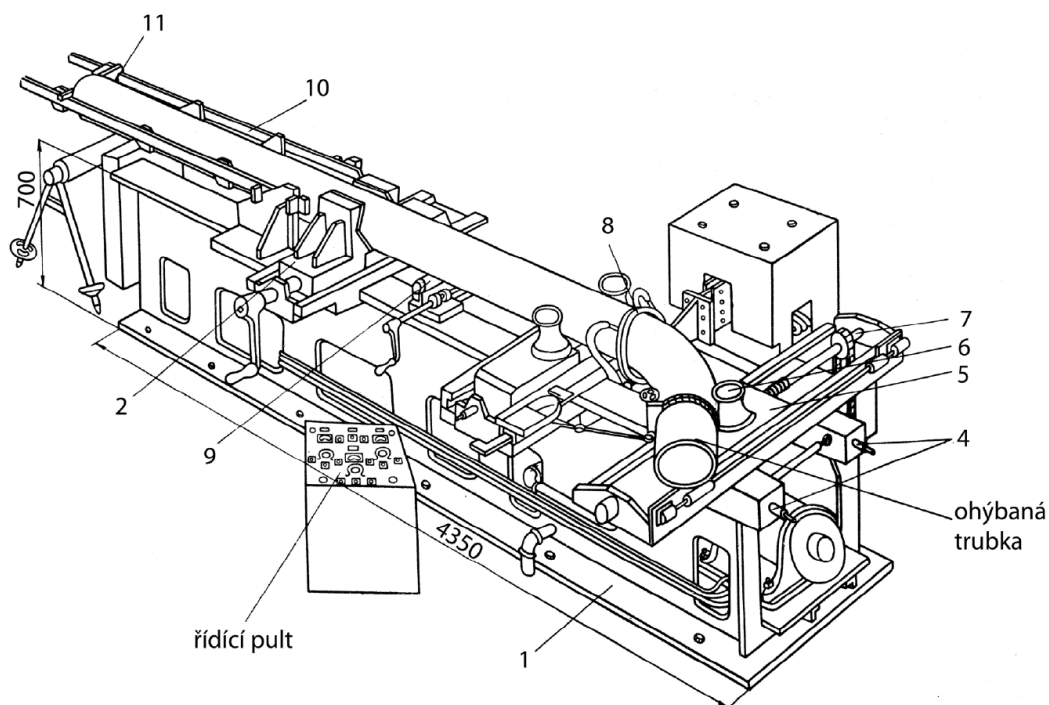


Obr. 9 Ohýbací stroj s indukčním ohřevem PB 850 firmy MODŘANY Power, a. s. [8]

2.2.3 Popis práce na ohýbacím stroji s indukčním ohřevem

Jedním z představitelů ohýbacích strojů s indukčním ohřevem pro ohýbání pomocí tlačných kladek je například stroj Cojafex SOT 325. Tento stroj je určen pro ohýbání trubek o průměrech 108 mm až 325 mm.

Stroj je tvořen svařovaným ocelovým ložem (1), ve kterém jsou uloženy příčné i podélné pohony posuvů. Na podélném suptu (2), který se pohybuje po vodících plochách lože pomocí pohybového šroubu s motorem s plynulou regulací otáček, je umístěn samostředící svěrák, který slouží k upnutí trubky. Tento supt je pevně spojen s táhly (10), opatřenými dorazy pro příčník (11). V přední části se nachází příčný supt (5), na kterém se nachází příčné sáně s ohýbací kladkou (6). Pohyb těchto saní je zprostředkován pohybovým šroubem s plynulou regulací (7). Stroj je vybaven konstrukcí pro induktor (8), který lze ustavit vodorovně i svisle vzhledem k požadované pozici ohýbané trubky. Celé zařízení je ovládáno z řídicího pultu s ovládacími prvky.



Obr. 10 Ohýbací stroj pro ohyb trubek SOT 325 [8]

Dle průměru ohýbané trubky je zvolen vhodný induktor, který je usazen do stroje v požadované poloze. Poté je ohýbaná trubka upnuta do svěráku podélného suportu. Dle průměru ohýbané trubky seřídí obsluha vodící kladky jak podélně tak příčně a následně trubku pomocí podélného suportu přesune do takového místa, aby induktor obepínal uvažovaný počátek ohybu. Provede vhodné nastavení ohýbacích kladek a požadovaného ohřevu. Po dosažení žádané tvářecí teploty zapne obsluha chlazení a zároveň uvede v činnost příčný i podélný posuv. Příčná kladka se přesune do předepsané polohy a ohyb pak má konstantní poloměr. Teplota ohřevu se reguluje pomocí změny rychlosti podélného posuvu nebo regulací vlastního indukčního ohřevu. Během tváření pak musí dělník sledovat také měřidla udávající odchylky od požadovaného poloměru ohybu trubky a dle potřeby tento parametr regulovat změnou polohy ohýbací kladky. Po dokončení tvářecí operace vypne obsluha ohřev, chlazení a posuv.

Technické parametry stroje SOT 325:

- | | |
|---|--------------------------------------|
| - vnější průměr ohýbané trubky (min/max): | 108 mm, |
| - maximální průřezový modul v ohybu W_0 | 930 cm ³ , |
| - maximální délka ohýbané trubky | 4000 mm, |
| - maximální tloušťka stěny | 12 mm, |
| - rychlost příčného posuvu | (0,018 ÷ 0,36) m·min ⁻¹ , |
| - rychlost podélného posuvu | (0,036 ÷ 0,72) m·min ⁻¹ , |
| - příkon posuvových elektromotorů | 4,2 kW, |
| - regulovatelné otáčky elektromotorů | (150 ÷ 3000) ot·min ⁻¹ . |

3 Výpočet a simulace procesu zkružování

Jednou z cest, kterými se moderní strojírenství ubírá, je využívání moderních simulačních systémů, založených na metodě konečných prvků (dále jen „MKP“). MKP je přibližná numerická metoda řešení chování deformovaného materiálu využívající rovnicový popis daného případu. Hlavní myšlenkou metody je nahrazení spojitých oblastí výrobku s nekonečným počtem bodů jednodušším prostředím, zejména jednoduchými geometrickými útvary, jejichž počet je nám znám - konečný počet prvků.

Přes poměrně dlouhou dobu, po kterou je metoda známa, nebylo její praktické využití vhodné vzhledem k velké pracnosti při řešení soustav rovnic popisujících vzájemné vazby konečných prvků. S nástupem moderních informačních technologií došlo k razantnímu rozvoji nových matematických metod urychlujících výpočty. S vývojem specializovaných programů bylo umožněno výpočtové ověřování správnosti návrhu nástrojů a chování zvoleného materiálu. Podle zjištěných výsledků je možné provést konstrukční úpravy návrhu ještě dříve, než dojde k jeho reálné výrobě. MKP tak dává konstruktérovi možnost přímého ověření návrhu již ve stadiu jeho vzniku. Správné nasazení MKP tedy může pozitivně ovlivnit počet verzí prototypů a zkoušek, čas potřebný na vývoj výrobku a jeho cenu, úroveň a kvalitu.

Pro vlastní simulaci procesu zkružování byl použit program QForm 5.1. Tento program, jehož název je vytvořen zkrácením slov **Q**uick **M**etal **F**orming **S**imulation, byl navržen pro jeho aplikaci jak ve výrobní, tak i výzkumné sféře. Vlastní software je založen na propracovaných algoritmech metody konečných prvků (MKP) vyvinutých firmou Quantor Ltd. Jeho ovládání je navíc velice intuitivní a pro jeho používání stačí jen základní znalosti technologie tváření.

Model tváření kovů realizovaný v QForm 5.1, pokud uživatel správně specifikuje skutečná technologická data, poskytuje realistické a úplné informace o průběhu tvářecího procesu jako je rozdělení toků, teploty a deformace v materiálu, o energii, síle apod.

3.1 Charakteristika materiálových reprezentantů

Analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla metodou konečných prvků byla v programu QForm 5.1 provedena na modelech, které reprezentovaly ocelové trubky vyrobené z materiálů označených 1.0501 (dle DIN C35) a 1.7242 (dle DIN 16CrMo4) o vnějším průměru $D = 530$ mm a tloušťce stěny $s = 20$ mm.

Ocel 1.0501 je představitelem konstrukční jakostní nelegované oceli určené k zušlechťování. Tato ocel je vhodná na výrobu hřídel stabilních spalovacích motorů a čerpadel, hřídel těžních strojů, klikových hřídel, věnců těžních strojů, sloupů a válců lisů, šroubů, pístnic, ojnic, strojních součástí k zušlechtění apod.

Materiál 1.7242 představuje nízkolegovanou Cr-Mo-V jakostní žárovečnou ocel, jejíž využití je vhodné na výrobu součástí použitých v energetických a chemických zařízeních pracujících při teplotách do 580 °C.

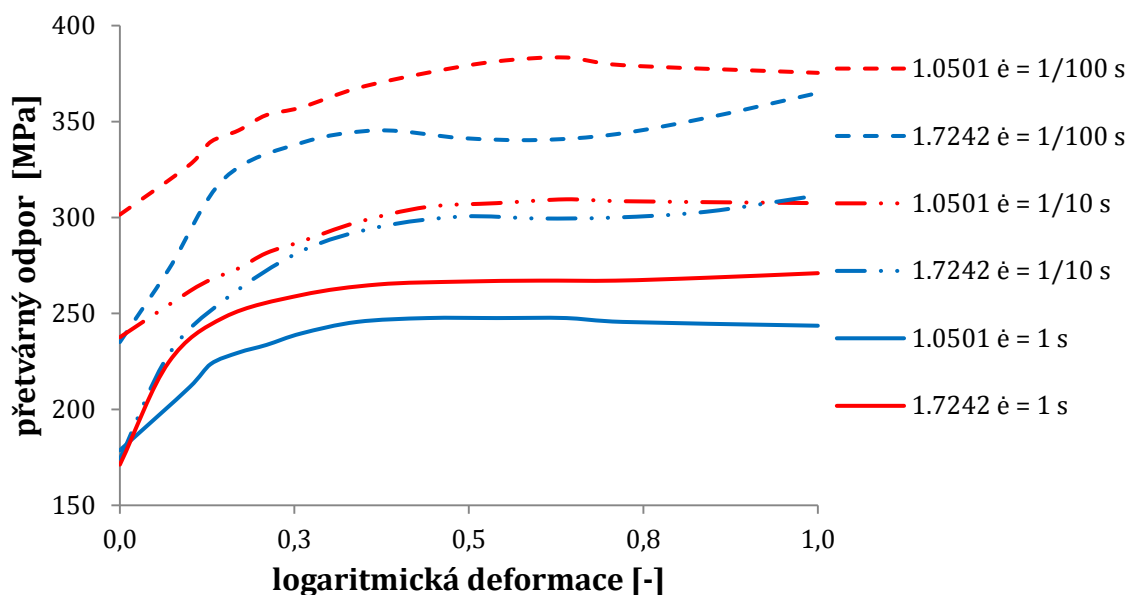
Tab. 3.1.1 Směrné chemické složení analyzovaných ocelí

označení materiálu	chemické složení [%]									
		C	Cr	Cu	Mn	Ni	Mo	P	S	Si
1.0501	min:	0,32	-	-	0,5	-	-	-	-	0,15
	max:	0,4	0,25	0,3	0,8	0,3	-	0,04	0,04	0,4
1.7242	min:	0,13	0,9		0,5		0,2	-		0,15
	max:	0,2	1,2		0,8	0,4	0,3	0,035	0,035	0,35

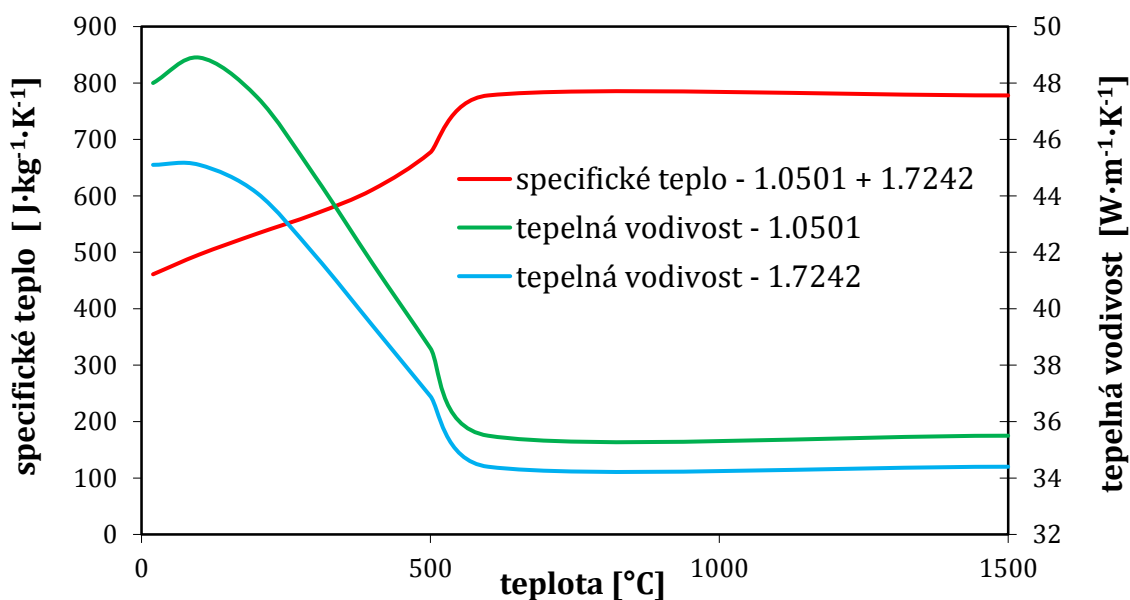
Tab. 3.1.2 Normalizované mechanické vlastnosti analyzovaných ocelí

Tab. 2 – Normalizované mechanické vlastnosti při +20 °C							
označení materiálu	Mez kluzu	mez pevnosti	tažnost	vrubová houž.	tvrdost	tepelná vodivost	teplotní souč.
	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	$KCU\ 3$ [J·cm ⁻²]	HB	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	α [K ⁻¹] · 10 ⁻⁶
1.0501	285	min 480	20	60	135-202	49	11.9
1.7242	≥ 365	490-690	≥ 18	podél ≥ 50	140-197	39.4	13.6

Jako materiálový model obou zkoumaných vzorků ocelových trubek byla využita databáze programu QForm 5.1. Tato databáze obsahuje maticový zápis materiálových parametrů obou představitelů. Tyto data byla sestavena aproximací z konstitutivní matice přetvárných odporů a teplotně závislých veličin viz obr. 11 a obr. 12 [14].



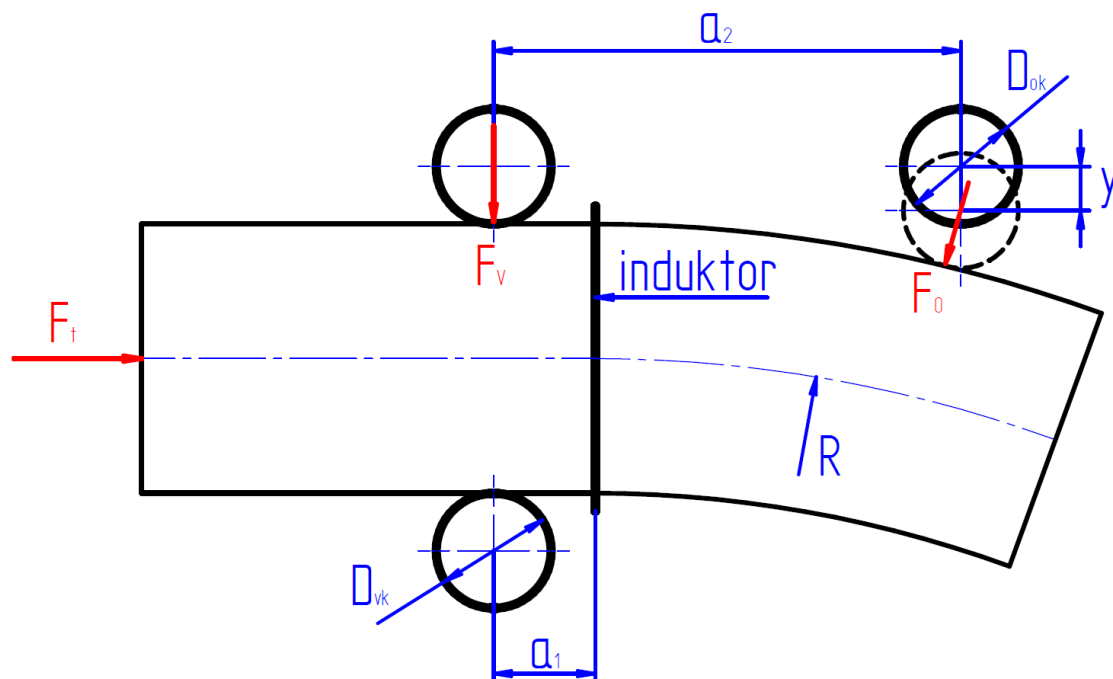
Obr. 11 Přetvárný odpor ocelí 1.0501 a 1.7242 při $T = 800$ °C



Obr. 12 Teplotně nezávislé parametry ocelí 1.0501 a 1.7242

3.2 Specifikace parametrů procesu zkružování

Ohýbací zařízení, pro které byla provedena analýza tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla, bylo koncipováno jako tlačné zařízení s vodícími kladkami a ohýbací kladkou. Ohýbaná trubka byla pomocí tlačného zařízení vtlačována mezi soustavu vodících kladek přes středofrekvenční indukční ohřev proti ohýbací kladce (obr. 13).



Obr. 13 Schéma ohýbacího stroje a působící silové reakce
(F_o – ohybová kladka, F_v – vodící kladky, F_t – tlačné zařízení)

Zkružování trubek za tepla je závislé na mnoha faktorech, které ve svém důsledku ovlivňují výslednou kvalitu provedeného ohybu. Hlavní omezující parametry vycházejí z použité ohýbací technologie, konstrukčního provedení nástroje a z materiálových vlastností tvářeného materiálu. Mezi tyto parametry se řadí:

- Délka ramene ohýbací kladky L ,
- hodnota posunutí ohybové kladky y pro nastavení poloměru oblouku,
- rychlost posuvu trubky v ,
- teplota ohřevu materiálu T v místě indukčního ohřívání.

3.2.1 Technologické parametry

Pro prováděnou analýzu tvářecích sil ohybu ocelových trubek za tepla a její správnost provedení byly důležité technologické parametry tvořené kombinací materiálových a rozměrových dat. Výsledným kvalitativním parametrem byla výsledná ovalita při dodržném poloměru ohybu a deformace na povrchu trubky.

Požadovaný poloměr ohybu trubek ovlivňují v praxi různé požadavky. S přihlédnutím k jednoduchosti výroby a proudění materiálů je výhodné ohybové poloměry trubek volit co největší. Největší poloměr ohybu je dán takovým stavem, kdy dojde k trvalému přetvoření deformovaných krajních vláken ohýbané trubky. Nejmenší poloměr ohybu je přímo závislý na tažnosti tvářeného materiálu a protažení vnějších vláken trubky nesmí překročit hodnoty prodloužení tvářeného materiálu, neboť by na jejím vnějším poloměru došlo ke vzniku nežádoucích trhlin [5].

Samotný výpočet minimálního poloměru ohybu trubky se v různých literaturách nepatrně liší, což je dáno především rozdílným využíváním ohýbacích technologií [5]:

$$R_{min} \geq 4 \cdot k \cdot (D - s) \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

R_{min} – minimální poloměr ohybu [mm],

k – materiálový koeficient minimálního poloměru [mm],

D – průměr ohýbané trubky [mm],

s – tloušťka stěny ohýbané trubky [mm].

Materiálový koeficient minimálního poloměru je hodnota, jež je přímo závislá na použité technologii ohýbání a na chemických a mechanických vlastnostech tvářeného materiálu. Pro tváření za studena nabývá hodnot 0,7 – 1, pro ohýbání za tepla je jeho hodnota doporučována minimálně 1,8 a vyšší.

Rozměr minimálního poloměru ohybu je základní technologický parametr, s nímž je propojeno nastavování ohýbacího zařízení, především nastavení vysunutí ohýbací kladky, délka ramene ohýbací kladky a rychlost posuvu ohýbané trubky.

3.2.2 Délka ramene kladky a nastavení kladek

Z hlediska konstrukčního provedení stroje a rozměrů ohýbané trubky je umístění ohýbací kladky jedním z limitujících parametrů. Tato kladka je konstruována jako posuvné rameno a její umístění v podélném a příčném směru je podle požadovaného poloměru ohybu nastavováno dle vztahu [14]:

$$y = R_n + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_n + \frac{D}{2} + r_2\right)^2 - (a_2 - a_1)^2} \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

y - vysunutí ohýbací kladky vzhledem k vodící kladce [mm],

R_n - nastavený poloměr ohybu pro dosažení požadovaného poloměru R po odpružení [mm],

D - vnější průměr trubky [mm],

r_2 - nejmenší poloměr ohýbací kladky [mm],

a_1 - vzdálenost induktoru a vodící kladky [mm],

a_2 - vzdálenost ohýbací a vodící kladky [mm],

R - poloměr ohybu trubky [mm].

Poloměr R_n , který je potřeba nastavit pro dosažení požadovaného poloměru ohybu R , lze vyjádřit ze vztahu:

$$R_n = \frac{R \cdot E \cdot I}{M_0 \cdot R + E \cdot I} \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

E - modul pružnosti v tahu materiálu ohýbané trubky [MPa],

I - moment setrvačnosti ohýbané trubky [mm⁴],

M_0 - ohybový moment [Nm].

Moment setrvačnosti ohýbané trubky I lze vyjádřit jako:

$$I = \frac{\pi \cdot [D - (D^4 - 2 \cdot s)^4]}{64} \quad [\text{mm}^4] \quad (3.4)$$

D - vnější průměr trubky [mm],

s - tloušťka stěny trubky [mm].

Při určování dynamických ohýbacích parametrů lze využít vztahy, které jsou určeny pro výpočet momentů a sil při zkružování profilů a potřebný vztah pro ohybový moment M_o vychází z rovnice pro plastický ohyb:

$$M_o = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{2 + n} \quad [\text{Nm}] \quad (3.5)$$

σ_p - přetvárný odpor materiálu trubky odpovídající teplotě a rychlosti plastické deformace [MPa],

W_o - průřezový modul v ohybu [mm³],

n - exponent zpevnění materiálu [-].

Z modifikovaného vztahu lze stanovit přítláčnou sílu vodící kladky F_v [14]:

$$F_v = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{2 \cdot (1 + n) \cdot R} \quad [\text{N}] \quad (3.6)$$

Ze vztahu upraveného pro zkružování lze stanovit přítláčnou sílu ohýbací kladky F_o [14]:

$$F_o = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W_o}{(1 + n) \cdot R} \quad [\text{N}] \quad (3.7)$$

Při běžném zkružování je krouticí moment přenášen z hnacího válce na zkružovaný profil třením. V tomto případě je ale vyvíjen tlak tečný k ohýbanému kruhovému oblouku a tak lze koeficient tření považovat za roven 1. Tento způsob výpočtu předpokládá rovnost reakcí F_v a F_o a síla působící na tlačné zařízení je shodná s ohýbací silou.

3.2.3 Rychlost posuvu trubky a teplota ohřevu materiálu

Rychlost posuvu a teplota ohřevu daného materiálu spolu úzce souvisí. Ohřev materiálu je závislý zejména na chemickém složení tvářeného materiálu a rozměrech ohýbané trubky, především na její tloušťce stěny a jejím průměru a musí být zajištěno rovnoměrné prohřátí v celém průřezu ohýbané trubky.

Pracovní rychlost posuvu tvářené trubky musí být podřízena rychlosti ohřevu materiálu s přihlédnutím k zamezení vzniku nerovnoměrně prohřátých tepelných pásů. Při ohýbání rozměrných trubek za tepla se teplota ohřevu materiálu pohybuje v rozmezí $750 \div 950^\circ \text{C}$ s pracovní posuvovou rychlostí $20 \div 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

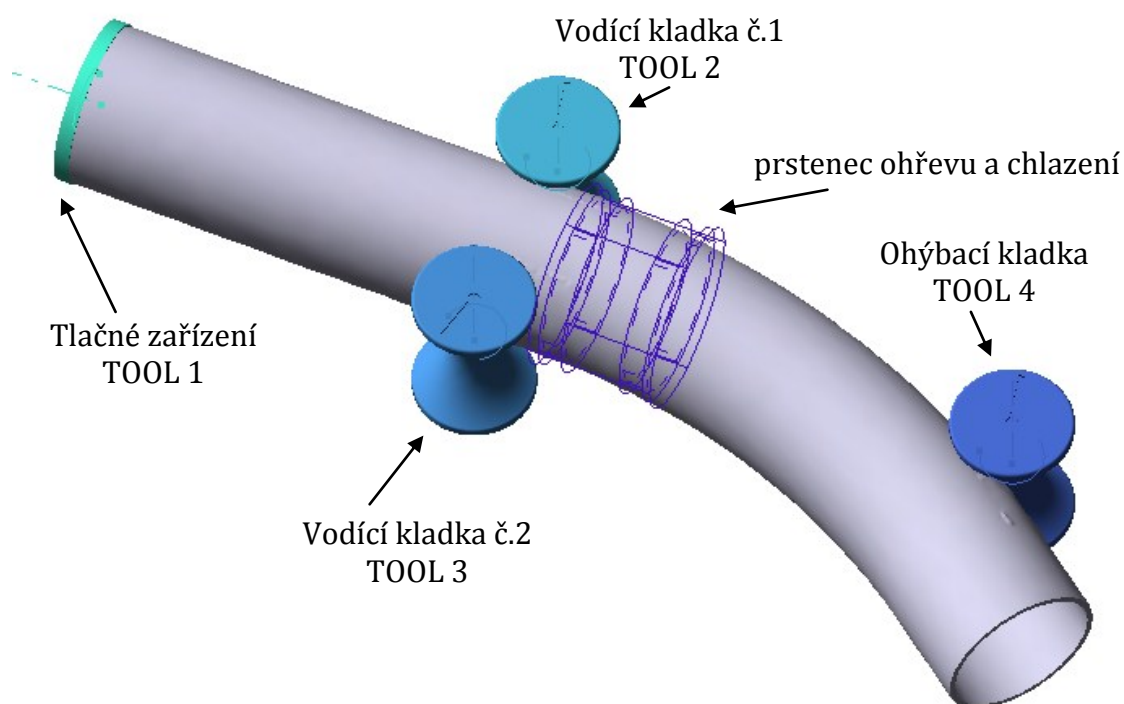
3.3 Jednotlivé fáze MKP výpočtu

Pro potřeby simulace v programu QForm 5.1 bylo nutné vytvořit modely použitelné pro tvorbu nástrojů a musely být stanoveny a respektovány všechny okrajové podmínky, mezi něž patří pohyb a dráha nástrojů, tlačná síla, koeficient tření, materiálové vlastnosti použité ocelové trubky a její rozměry.

3.3.1 Tvorba geometrického modelu

S pomocí programu SOLID EDGE 3D byly vytvořeny modely tlačného zařízení, vodící a ohýbací kladky a model trubky (obr. 14), které byly pro potřeby simulačního programu QForm převedeny do formátu STEP.

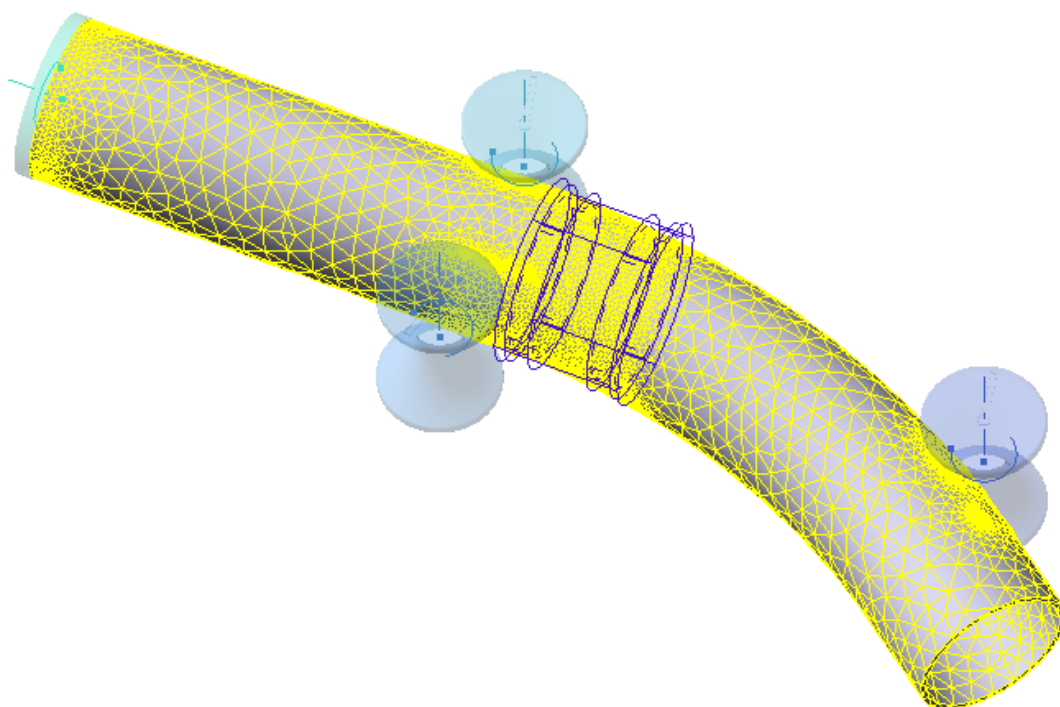
Procesní model ohýbání je zobrazen na obr.14. Model ocelové trubky byl pro zjednodušení a zrychlení výpočtu simulace upraven předechnutím na hodnotu 15°. Tato úprava pomohla zajistit bezpečné počáteční podmínky simulace.



Obr. 14 Model tlačného zařízení s ohýbací kladkou a dvěma vodícími kladkami

3.3.2 Tvorba sítě elementů v programu QForm

Do programu QForm 5.1 byly postupně vloženy všechny modely představující ocelovou trubku, vodící a ohýbací kladky a tlačné zařízení, které byly vyjádřeny pouze plochami a čarami. Vlastní síť elementů byla vytvořena v programu QForm 5.1. Jednotlivé díly byly pojmenovány TOOL 1 (tlačné zařízení), TOOL 2 a 3 (vodící kladky), TOOL 4 (ohýbací kladka) a WORKPIECE (ocelová trubka).



Obr. 15 Vytvořená síť elementů na povrchu ohýbané ocelové trubky

3.3.3 Definice okrajových podmínek

Mimo vytvořených nástrojů byly pro potřeby simulace definovány všechny okrajové podmínky, mezi něž patří pohyb a dráha nástrojů, tlačná síla, koeficient tření, teplota indukčního ohřevu a materiálové vlastnosti použité ocelové trubky.

Směr pohybu vykonávaný tlakem na tlačné zařízení (TOOL 1) bude pouze dopředný působící ve směru ohýbací kladky (TOOL 4), pomocí které je trubka ohýbána do požadovaného rozměru. Ohýbaná trubka (WORKPIECE) je vedena

ve dvou bodech pomocí vodících kladek (TOOL 2,3). Na modelu (viz obr. 14) je zobrazen i ohřívací prstenec, pomocí něhož byla provedena simulace středofrekvenčního indukčního ohřevu a následného chlazení ohýbané trubky.

Tab. 3.1 Zadané parametry jednotlivých nástrojů

TOOL 1 – tlačné zařízení	
Tool type	Rotational
Direction of motion	Along OX (1,0,0)
Linear velocity	0,417 mm.s ⁻¹
Direction of station	Clockwise
Speed of station	0 revo
TOOL 2 – vodící kladka č.1	
Tool type	Rotational
Direction of motion	Opposite OY (0,-1,0)
Linear velocity	0 mm.s ⁻¹
Direction of station	Counter CW
Speed of station	0,054134 revo
TOOL 3 – vodící kladka č.2	
Tool type	Rotational
Direction of motion	Along OY (0,1,0)
Linear velocity	0 mm.s ⁻¹
Direction of station	Counter CW
Speed of station	0,054134 revo
TOOL 4 – ohýbací kladka	
Tool type	Rotational
Direction of motion	Opposite OY (0,-1,0)
Linear velocity	0 mm.s ⁻¹
Direction of station	Counter CW
Speed of station	0,054134 revo

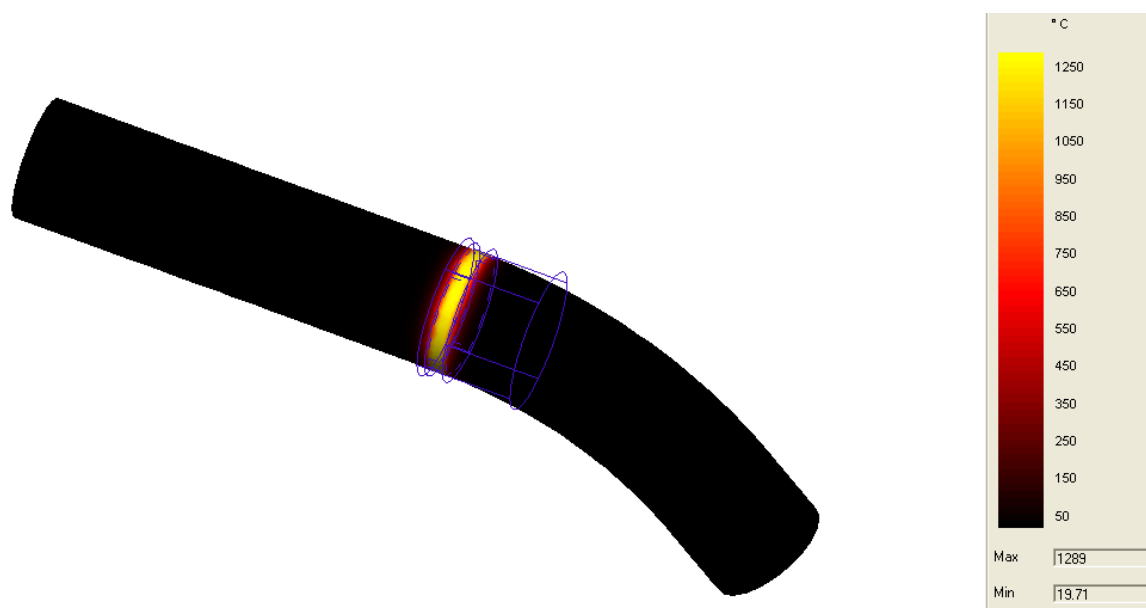
3.4 Vlastní výpočet

Simulační proces byl v software QForm 5.1 rozdělen do dvou částí, které na sebe přímo navazovaly. Vzhledem k časové náročnosti došlo k pozastavení výpočetního cyklu po provedení výpočtů, které svým rozsahem odpovídaly délce výstupního oblouku trubky ohnuté o úhel 15°.

V první části (ACTION 1) bylo provedeno nastavení systému potřebné pro simulace předehřevu materiálu ohýbané trubky na startovací teplotu vyžadovanou pro ohýbací proces.

Tab. 3.2 Zadané parametry simulačního procesu ACTION 1

ACTION 1 –startovací předehřev ohýbané trubky	
Type	Cooling/Heating in air
Type of workpiece	Arbitrary (3D)
Process elapse time	120 s
Workpiece temperature	21° C
Workpiece material (dle druhu ohýbaného materiálu)	16CrMo4 / 12040



Obr. 16 Pohled na teplotní pole po ukončené simulaci v první fázi

V následující operaci (ACTION 2) bylo provedeno nastavení potřebných vstupních parametrů pro vlastní ohýbací proces, který navazoval na předchozí operaci a započal ihned po ohřátí materiálu provedeného v předchozím kroku.

Tab. 3.3 Zadané parametry simulačního procesu ACTION 2

ACTION 2 – technologický proces ohýbání ocelové trubky		
Type		Deformation in rotational equipment
Type of workpiece		Arbitrary (3D)
Thermal processes		Yes
Process in tool		Not simulated
Process elapse time		1678 s
Temperature from previous action		Yes
Workpiece material (dle druhu ohýbaného materiálu)		16CrMo4 / 12040
Initial tool temperature	TOOL 1 – tlačné zařízení	20 °C
	TOOL 2 – vodící kladka č.1	20 °C
	TOOL 3 – vodící kladka č.2	20 °C
	TOOL 4 – ohýbací kladka	20 °C
Lubricant	TOOL 1 – tlačné zařízení	gw-st-h
	TOOL 2 – vodící kladka č.1	ideal
	TOOL 3 – vodící kladka č.2	ideal
	TOOL 4 – ohýbací kladka	ideal

Jakmile byla připravena všechna vstupní data, bylo provedeno zahájení výpočtové simulace celého řetězce operací. Po rozběhnutí vlastního systémového řešiče simulačního programu QForm 5.1 bylo zobrazeno systémové okno ukazující průběžný stav výpočtů a předpokládaný čas dokončení celého řešení.

3.5 Zpracování výsledků simulace

Výsledky simulace uložené v souborech *.qfm byly podrobeny analýze v programu QForm Viewer. Soubor *.qfm obsahuje kromě nezměněných dat modelu veškeré informace o průběhu simulace tažení vytvořené řešičem QForm 5.1. V nabídce tohoto programu je k dispozici celá řada analýz, podle kterých je možno tvářecí proces hodnotit.

Vzhledem ke snížení časové náročnosti vlastního výpočtu byl upraven polotovar ocelové trubky předehtutím tak, aby došlo mezi trubkou a ohýbací kladkou ke styku v přesně vymezené pozici (viz obr. 14). Ze stejného důvodu bylo provedeno pozastavení výpočtů po dosažení ohybu trubky odpovídající úhlu 15°, kdy se již ustálily silové účinky působící na ohýbací i vodící kladky a také nedochází k výraznějším změnám ovality výsledného polotovaru.

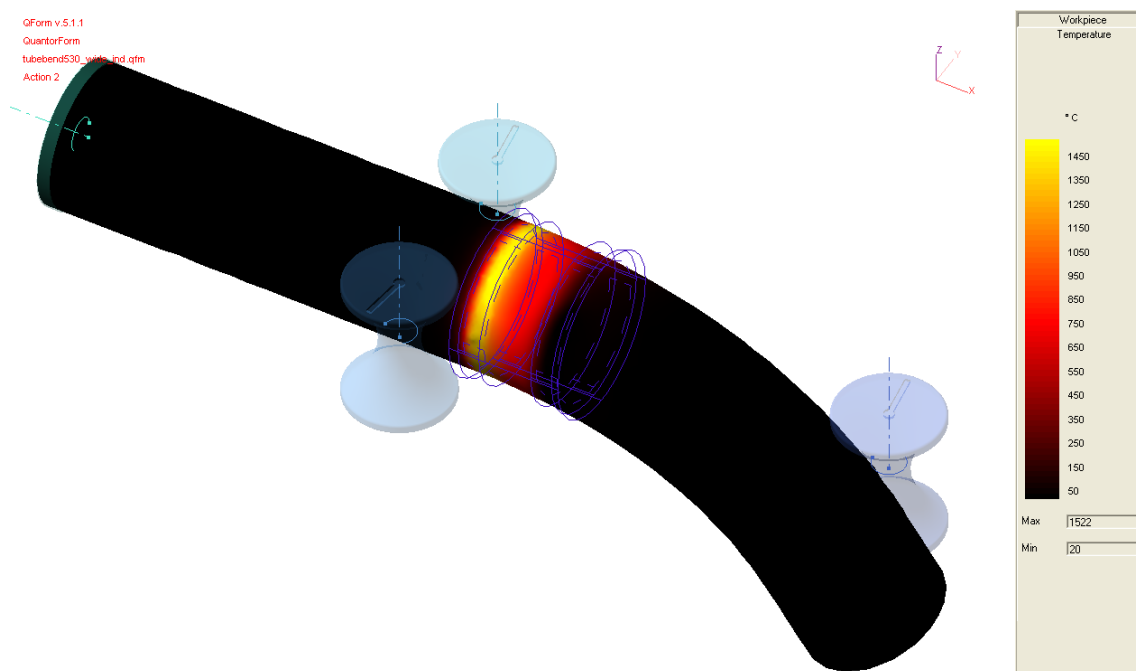
Pro vyhodnocení získaných výsledků zkoumané technologie ohybu ocelových trubek za tepla byly zvoleny tyto analýzy:

- Workpiece Temperature – distribuce teplotního pole,
- Workpiece Effective strain – efektivní deformace,
- Workpiece Mean stress – střední (hydrostatické) napětí,
- Deformace trubky,
- Zatížení jednotlivých kladek.

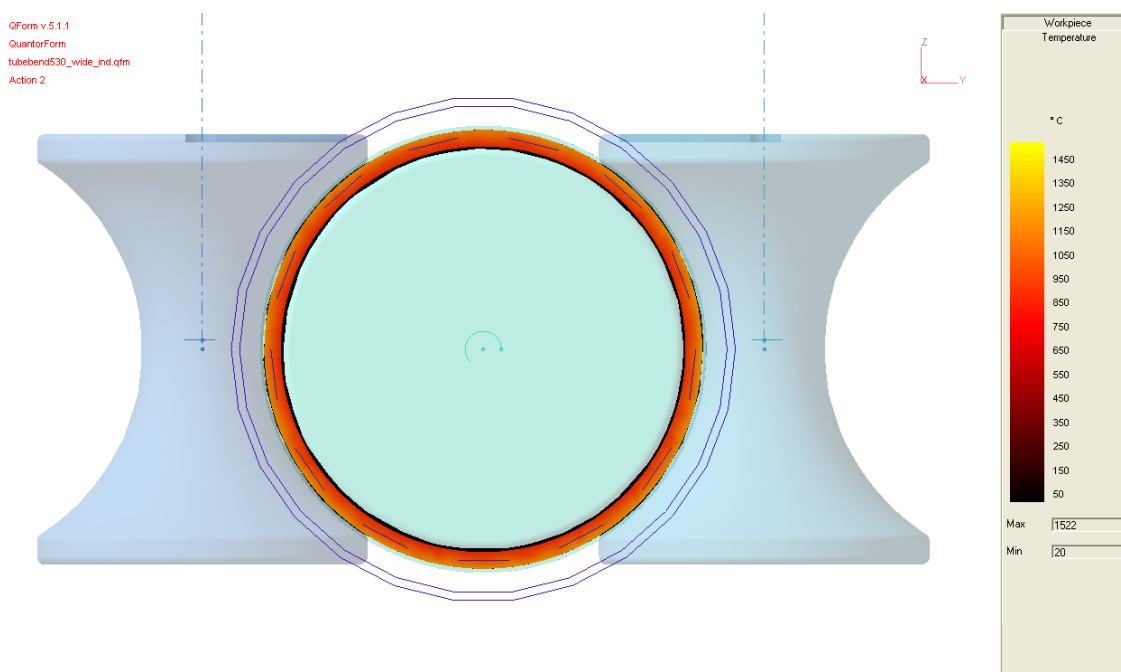
4 Výsledky simulace procesu zkružování

U každé trubky byly, vzhledem k možnému porovnání výsledků, provedeny tytéž analýzy a jejich výsledky byly rozděleny do jednotlivých kapitol.

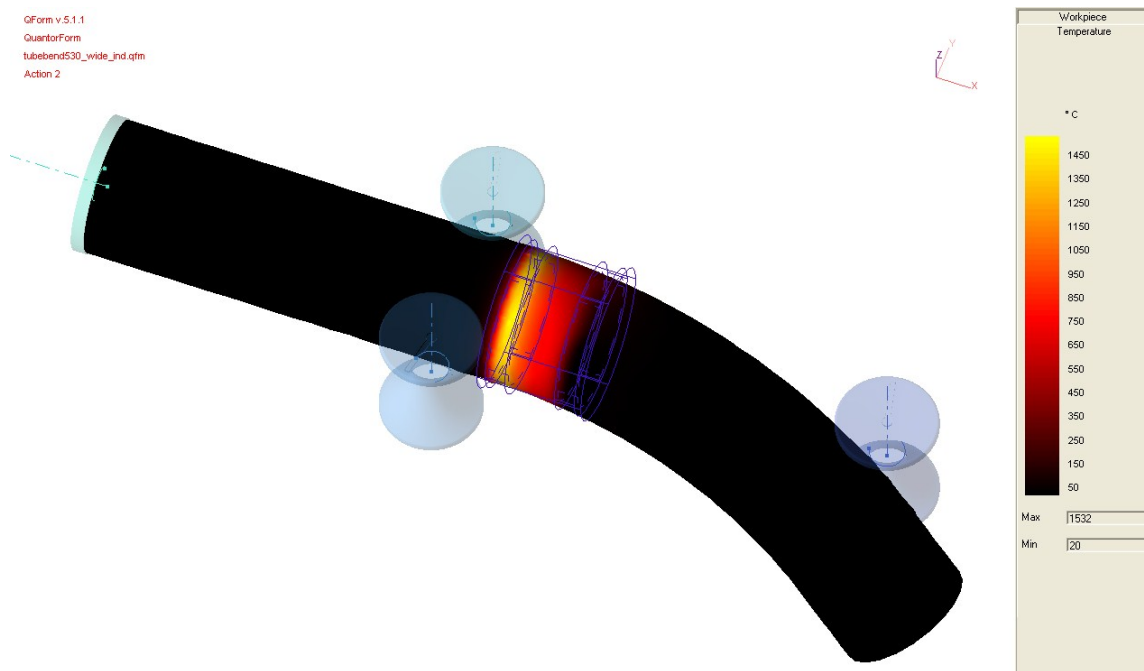
4.1 Distribuce teplotního pole



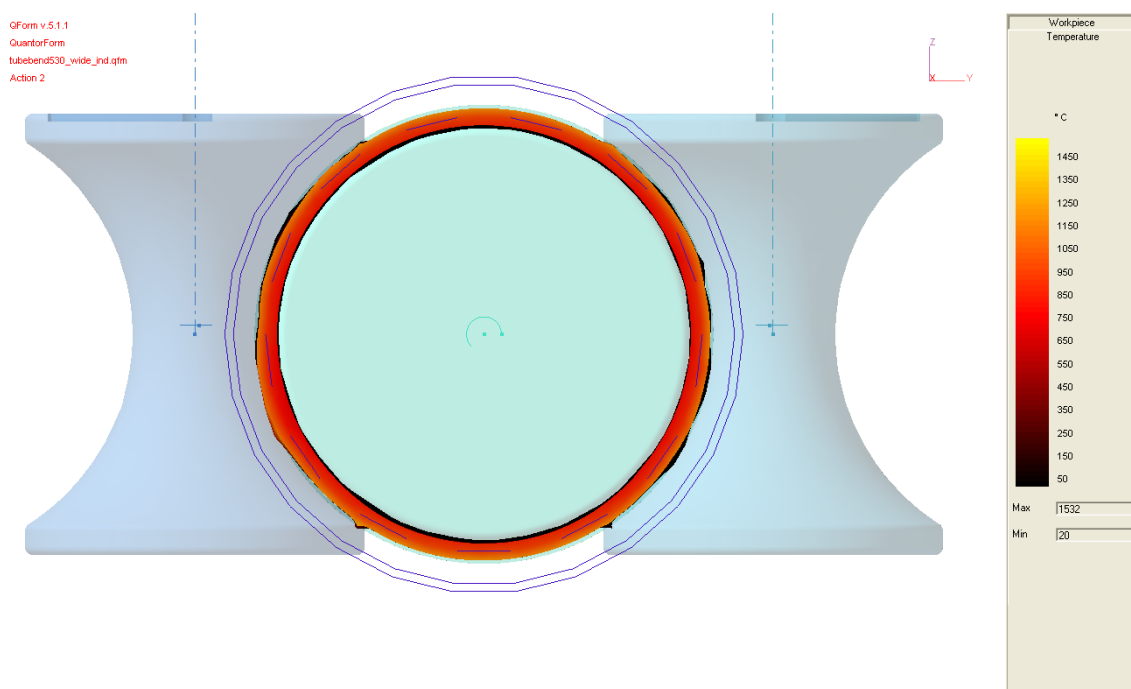
Obr. 17 Průběh tepelného zatížení ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501



Obr. 18 Tepelného zatížení ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501 v řezu

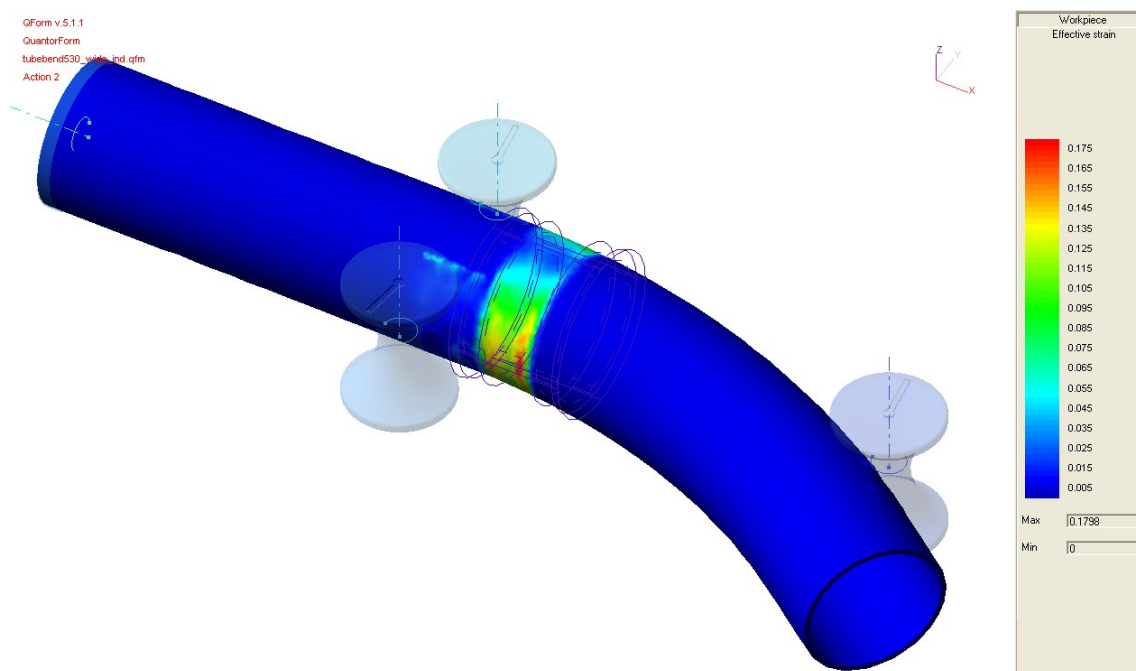


Obr. 19 Průběh tepelného zatížení ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242

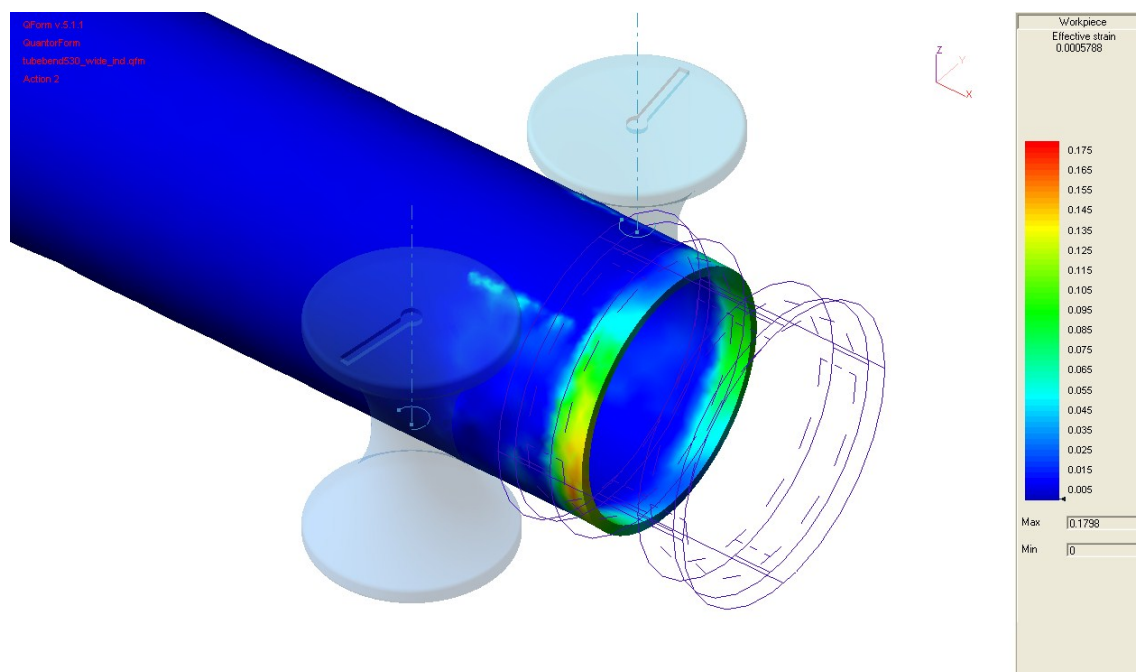


Obr. 20 Tepelného zatížení ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242 v řezu

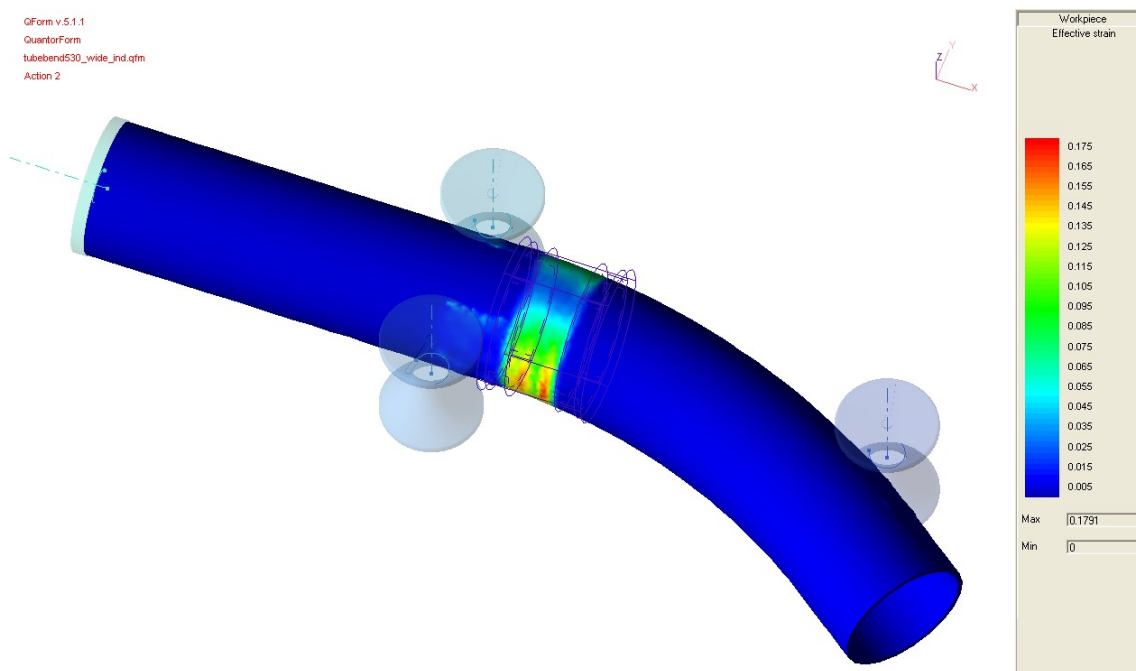
4.2 Efektivní deformace



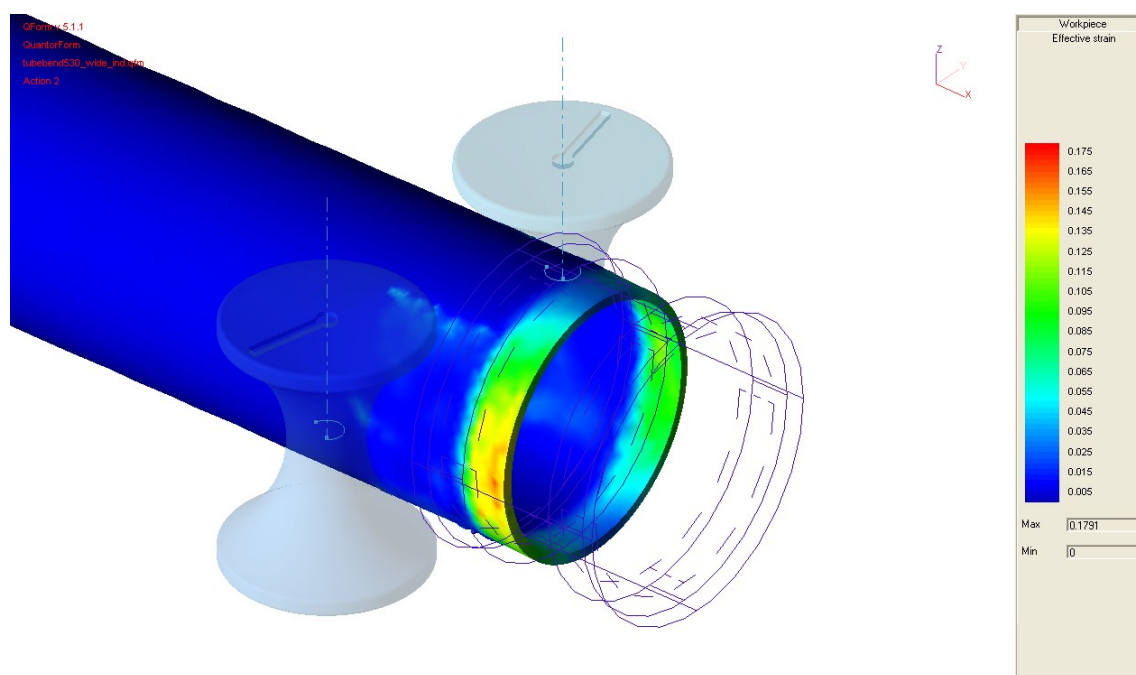
Obr. 21 Efektivní deformace ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501



Obr. 22 Znáznornění průběhu efektivní deformace v místě ohřevu
ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501

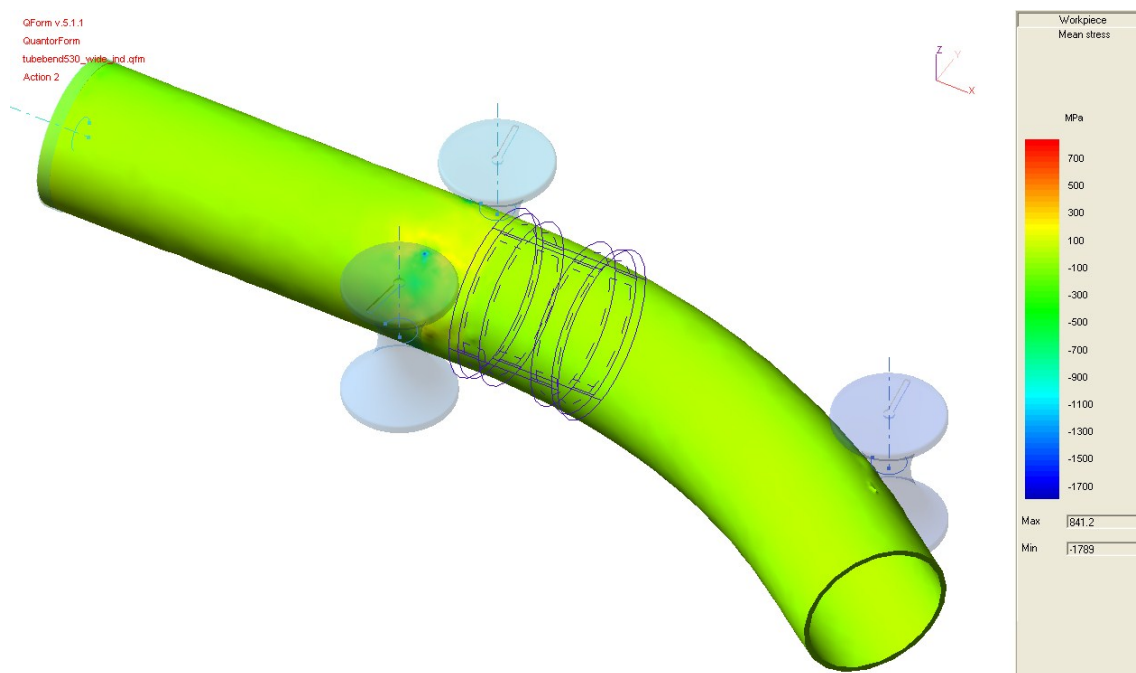


Obr. 23 Efektivní deformace ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242

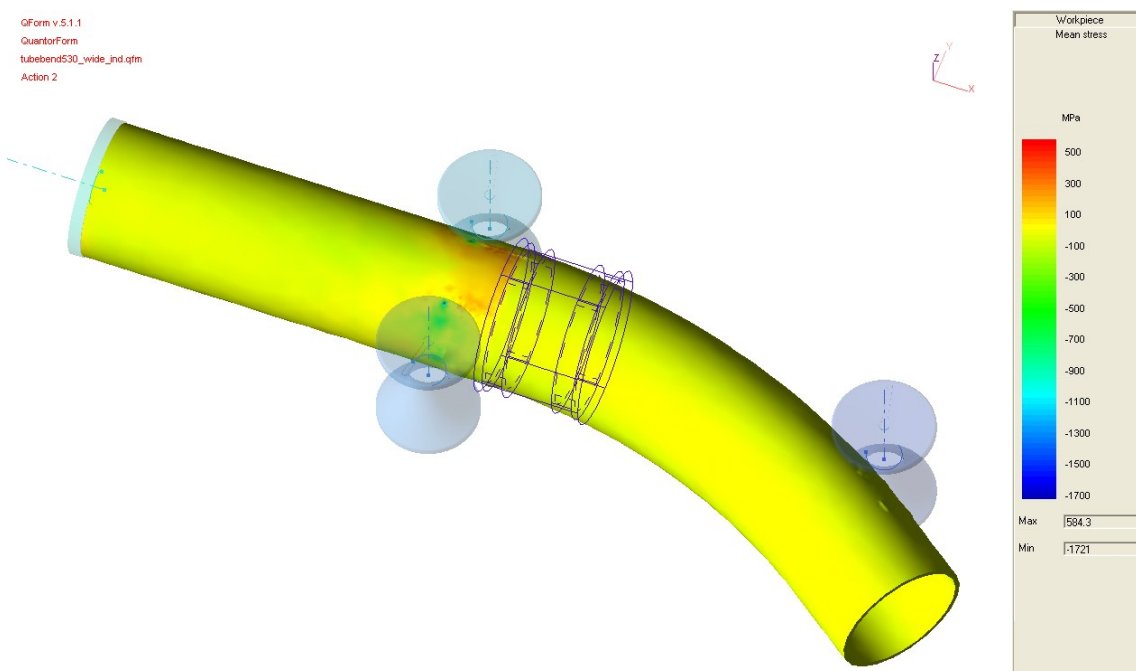


Obr. 24 Znázornění průběhu efektivní deformace v místě ohřevu
ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242

4.3 Střední napětí

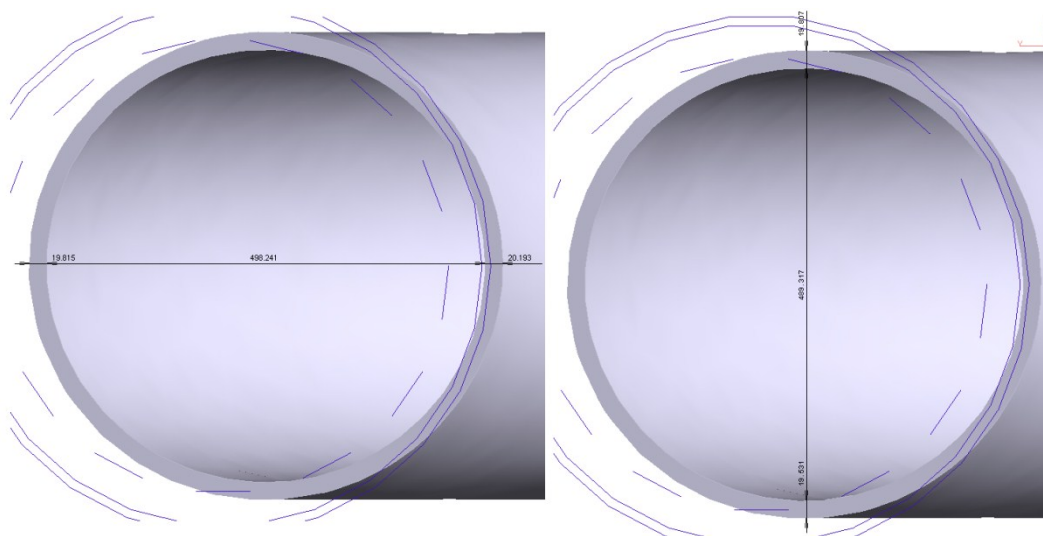


Obr. 25 Střední napětí ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501

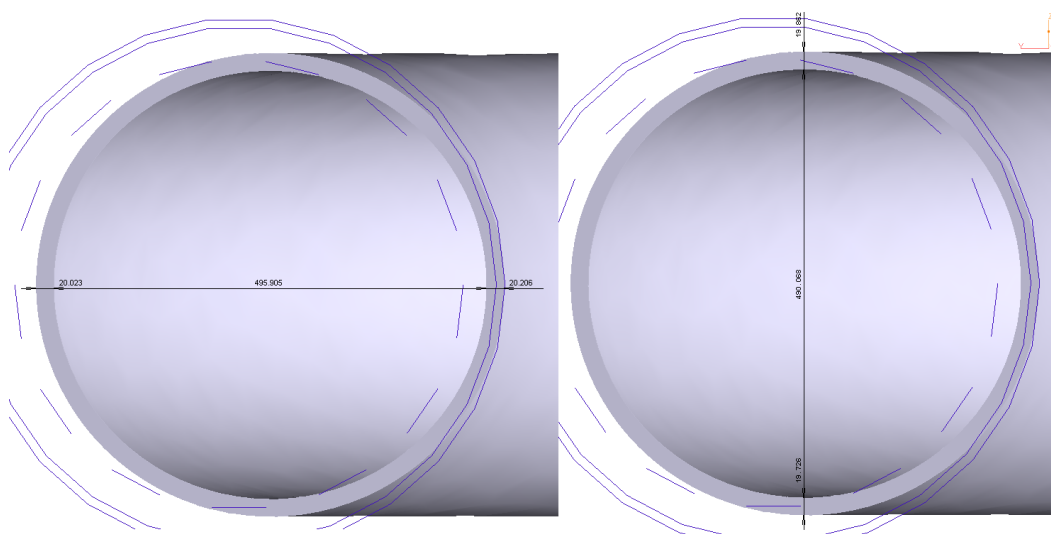


Obr. 26 Střední napětí ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242

4.4 Deformace ohýbané trubky



Obr. 27 Rozměry stěn a vnitřního průměru ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.0501



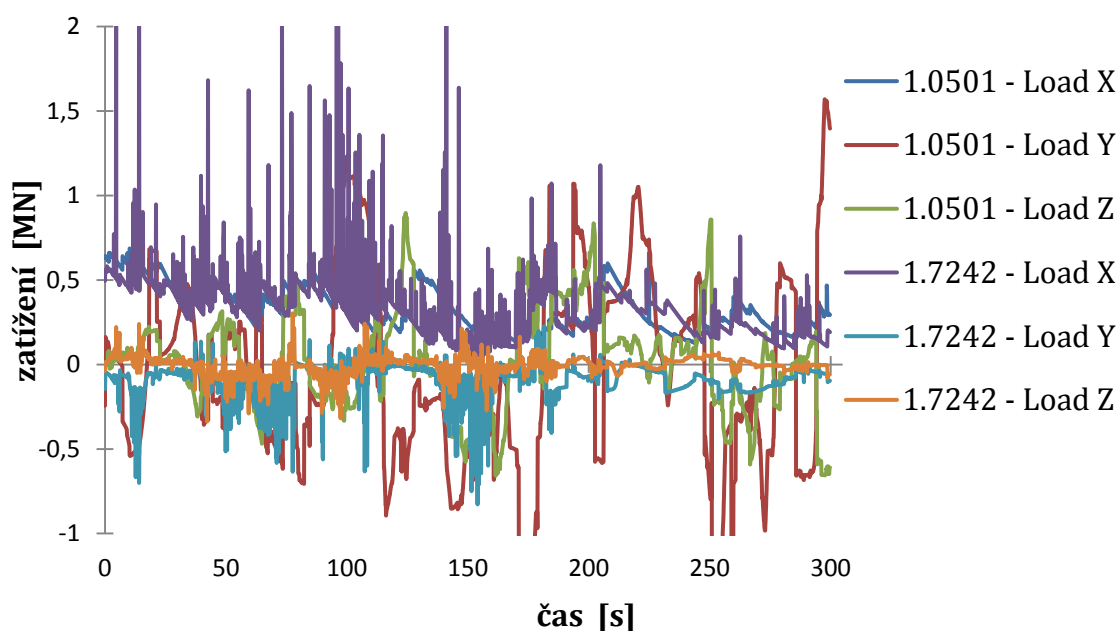
Obr. 28 Rozměry stěn a vnitřního průměru ohýbané ocelové trubky D530/20 z materiálu 1.7242

Tab. 4.4.1 Hodnoty naměřených průměrů a poměrná ovalita ohýbaných trubek

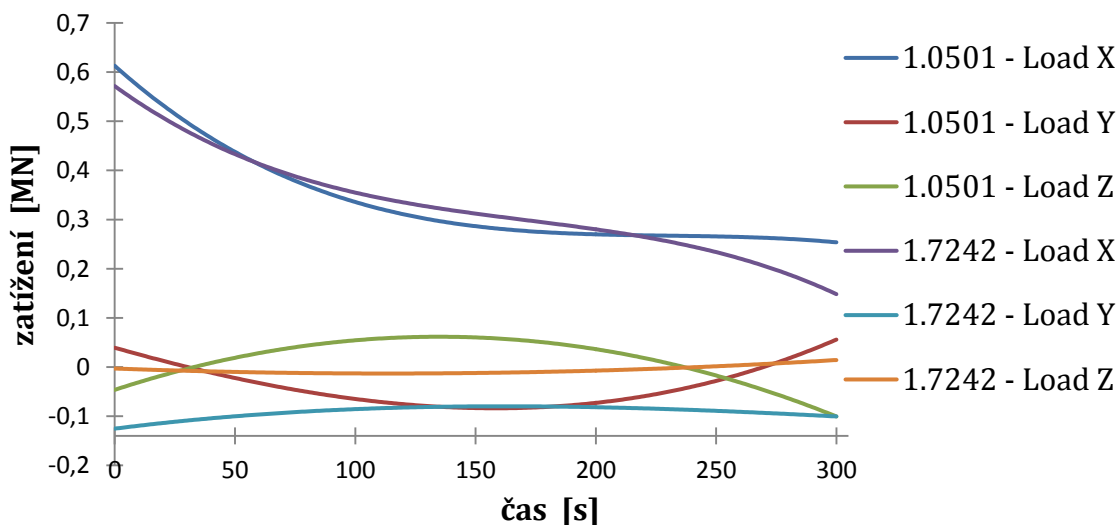
materiál	1.0501		1.7242	
vnější průměr [mm]	D_Y	D_Z	D_Y	D_Z
	538,249	528,655	536,134	529,656
poměrná ovalita K_o [%]	1,81		1,22	

4.5 Zatížení jednotlivých kladek

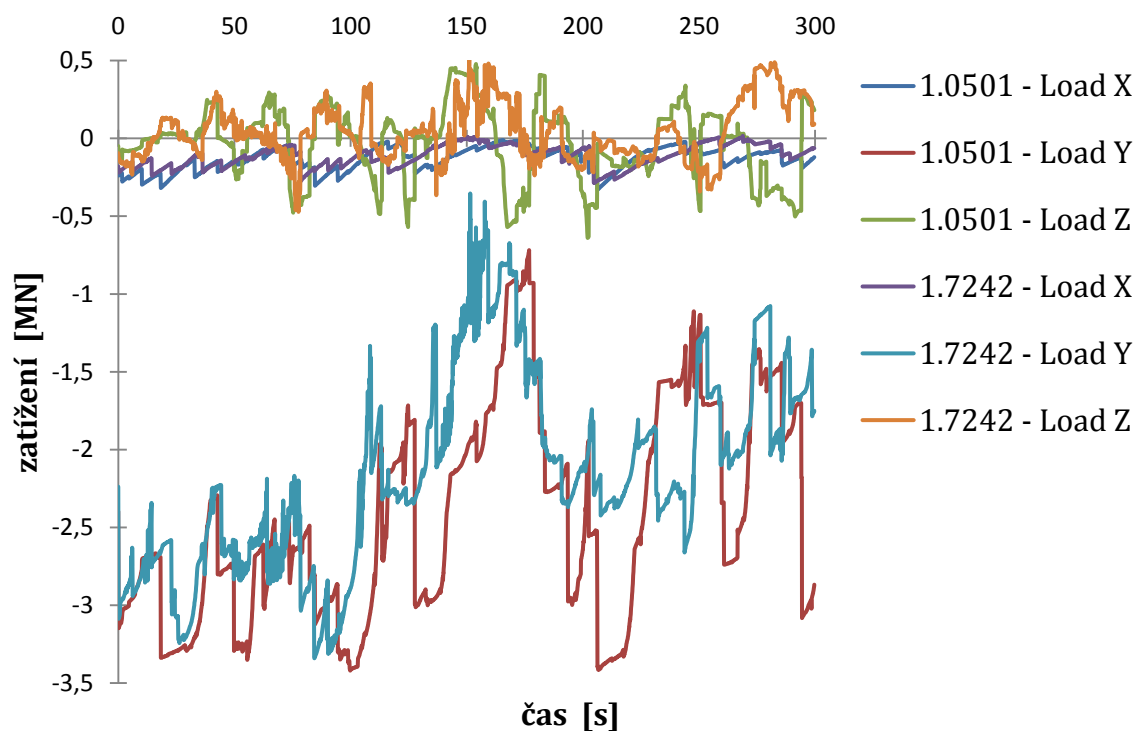
Hlavním cílem provedené analýzy bylo stanovení působících sil na jednotlivé části ohýbacího stroje. Z výsledků MKP vyplynulo, že největší síly působí na vodící kladky a vlastní směr působení silových reakcí na jednotlivých částech stroje byl rozdílný. Průběhy sil působících na jednotlivé části stroje jsou pro oba materiálové představitele 1.0501 a 1.7242 zobrazeny v grafech č. 1 ÷ č. 10 a jejich maximální hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.5.1.



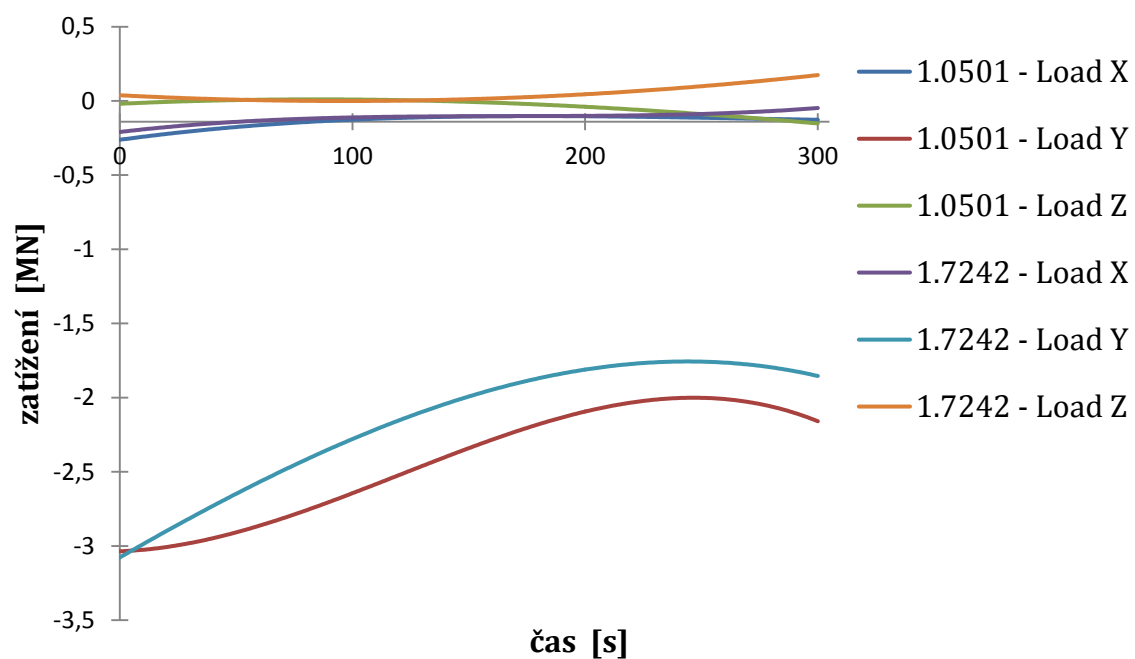
Graf č. 1 Zatížení tlačného zařízení (TOOL 1)



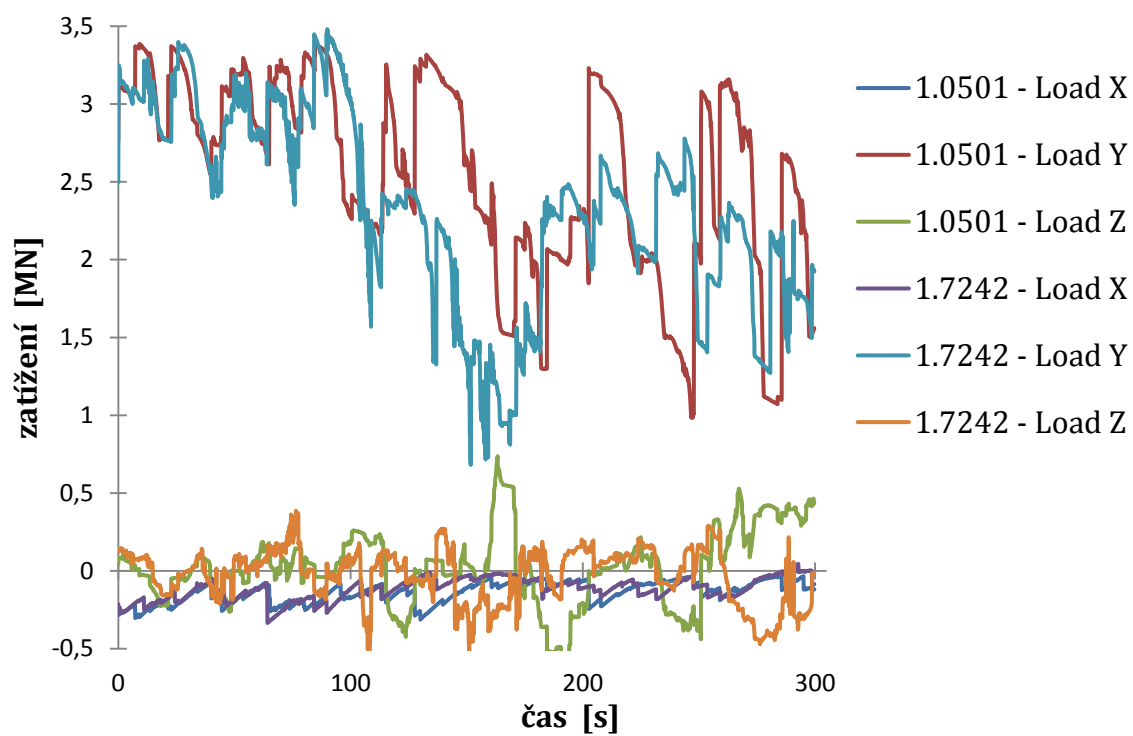
Graf č. 2 Zatížení tlačného zařízení (TOOL 1) – polynommická aproximace 3. řádu



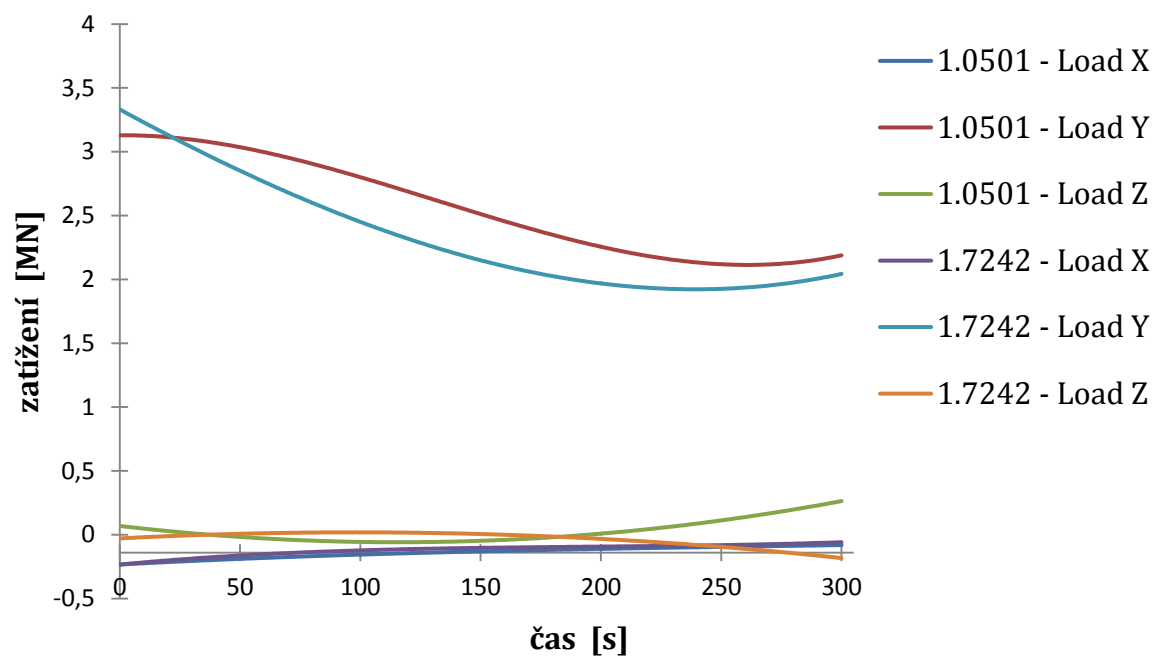
Graf č. 3 Zátížení vodící kladky č. 1 (TOOL 2)



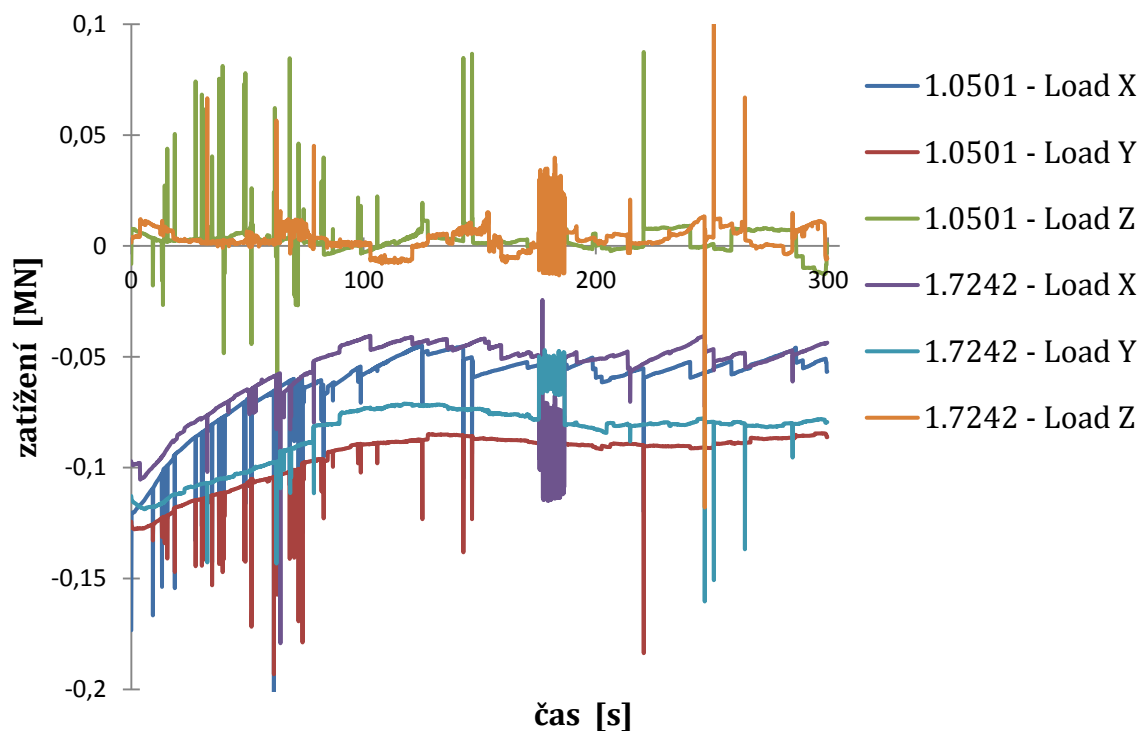
Graf č. 4 Zátížení vodící kladky č. 1 (TOOL 2) – polynomická aproximace 3. řádu



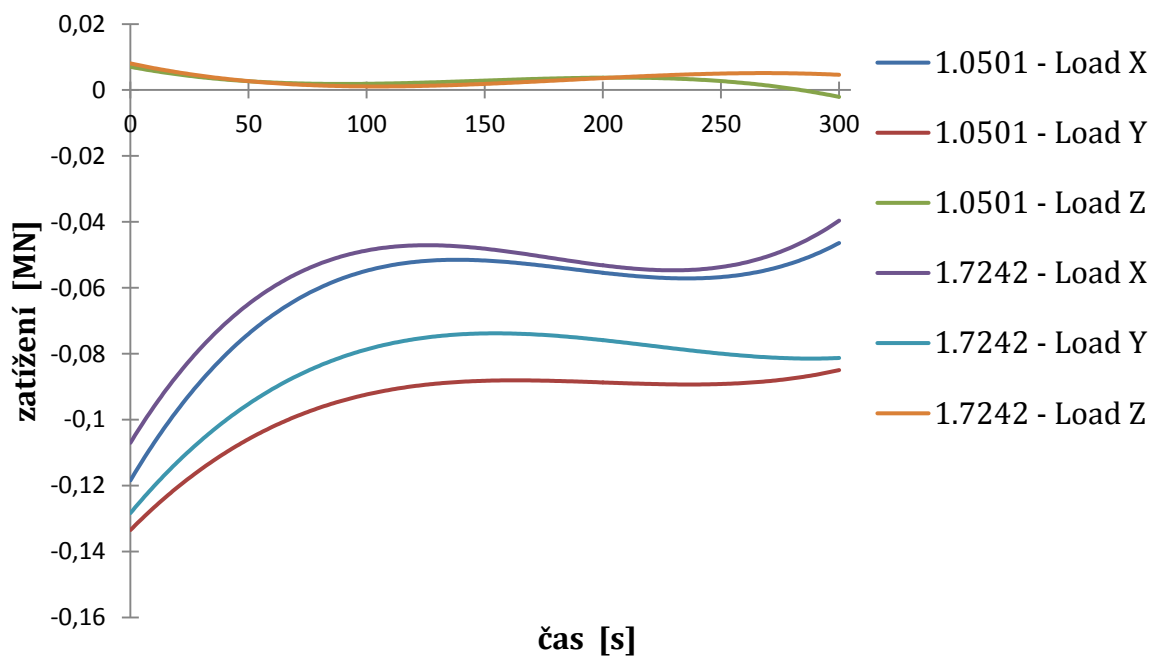
Graf č. 5 Zatížení vodící kladky č. 2 (TOOL 3)



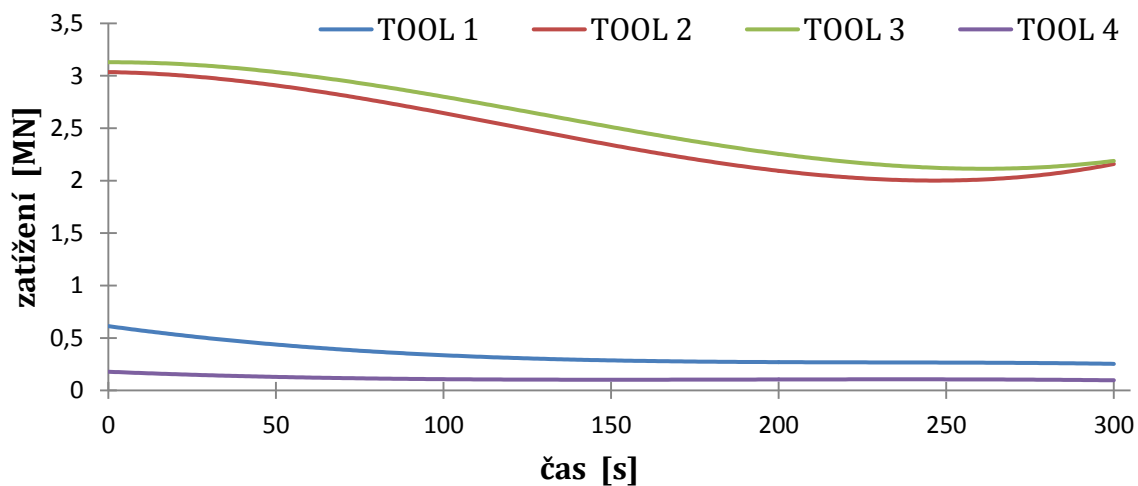
Graf č. 6 Zatížení vodící kladky č. 2 (TOOL 3) – polynommická aproximace 3. řádu



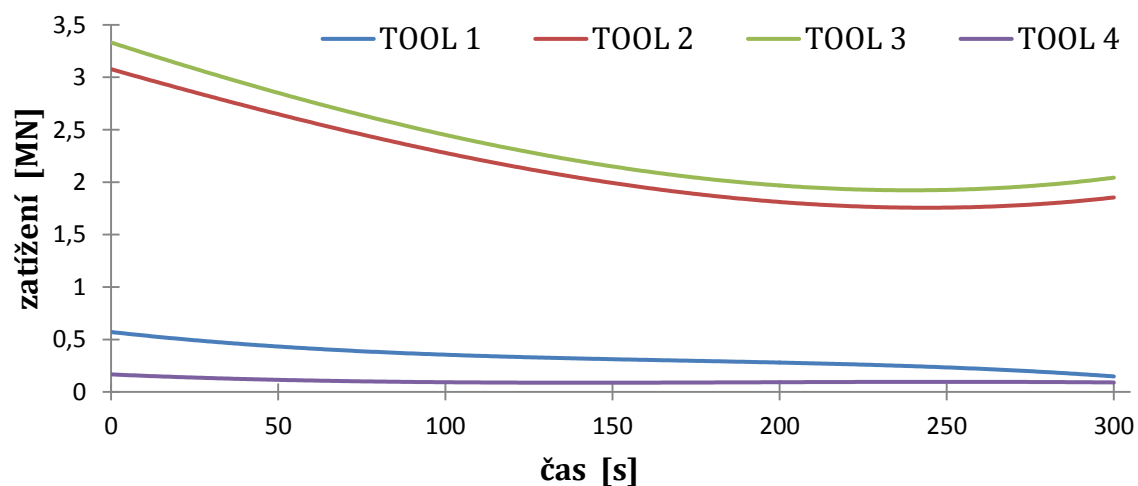
Graf č. 7 Zatížení ohýbací kladky (TOOL 4)



Graf č. 8 Zatížení ohýbací kladky (TOOL 4) – polynomická aproximace 3. řádu



Graf č. 9 Průběh maximálních sil působících na tlačné zařízení (TOOL 1), vodící kladky č. 1 a 2 (TOOL 2,3) a ohýbací kladku (TOOL 4) v závislosti na čase při ohýbání ocelové trubky D530/20 za tepla vyrobené z materiálu 1.0501



Graf č. 10 Průběh maximálních sil působících na tlačné zařízení (TOOL 1), vodící kladky č. 1 a 2 (TOOL 2,3) a ohýbací kladku (TOOL 4) v závislosti na čase při ohýbání ocelové trubky D530/20 za tepla vyrobené z materiálu 1.7242

Tab. 4.5.1 Silové poměry působící na jednotlivé části ohýbacího stroje

D530/20	TOOL 1			TOOL 2			TOOL 3			TOOL 4		
	tlačné zařízení			vodící kladka č. 1			vodící kladka č. 2			ohýbací kladka		
	F_x [MN]	F_y [MN]	F_z [MN]	F_x [MN]	F_y [MN]	F_z [MN]	F_x [MN]	F_y [MN]	F_z [MN]	F_x [MN]	F_y [MN]	F_z [MN]
1.0501	0.61	0.08	0.10	0.26	3.04	0.15	0.23	3.13	0.26	0.12	0.13	0.01
1.7242	0.57	0.13	0.01	0.21	3.08	0.17	0.23	3.33	0.18	0.11	0.13	0.01

5 Zhodnocení dosažených výsledků

Výsledky provedených simulačních výpočtů byly mezi sebou porovnány v programu QForm Viewer s pomocí analýzy efektivní deformace, středního napětí, rozložení teplotního pole, deformace trubky v ohybu a zatížení jednotlivých kladek.

Vyhodnocení rozložení teplotních polí v místě ohřevu provedené působením středofrekvenčního indukčního zdroje je zobrazeno na obr. 17, 18, 19, 20. Pro oba materiály (1.0501 a 1.7242) dosahuje tato teplota na povrchu ohýbané trubky hodnot blížících se teplotě tavení materiálu ($T = \text{cca. } 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Směrem ke středu ohýbané trubky tato teplota klesá a její hodnota se pohybuje kolem $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pro posouzení stavu ocelových trubek po tváření byla zvolena jako hlavní analýza efektivních deformací (obr. 21, 22, 23, 24) a analýza geometrických změn v ohýbaném profilu (obr. 27, 28). Na rozložení deformací je patrná neutrální stopa. Nejvyšší hodnoty efektivní deformace byly naměřeny na vnitřní straně ohýbaného poloměru (pro materiál 1.0501 – 0,1798, pro materiál 1.7242 – 0,1971). V obou případech analyzovaných materiálových reprezentantů se tvorba oblouku požadovaného poloměru ohybu jevila rovnoměrná a bez závad. Hodnota poměrné ovality (viz tab. 4.4.1) byla stanovena 1,81 % pro materiál 1.0501 a 1,22 % pro materiál 1.7242.

Hlavním výstupem provedené analýzy bylo stanovení silových reakcí na hlavní části ohýbacího soustrojí (graf č. 1 ÷ 10). U obou zkoumaných materiálových reprezentantů bylo zjištěno, že největší zatížení působí na vodící kladky. Směry působení silových reakcí pro jednotlivé části ohýbacího stroje byly rozdílné. Tlačné zařízení bylo namáháno proti směru jeho pohybu. Ohýbací kladka byla zatížena silou směřující směrem od středu vznikajícího oblouku ohybu. Směr namáhání vnější vodící kladky č. 1 byl shodný s ohýbací kladkou a směr namáhání vodící kladky č. 2 (vnitřní) byl orientován opačně.

Pro tlačné zařízení (graf č. 1, 2) byly zaznamenány maximální hodnoty zatěžujících sil $F_{X1.0501} = 0,61 \text{ MN}$ a $F_{X1.7242} = 0,57 \text{ MN}$, u ohýbací kladky (graf č. 7, 8) $F_{X1.0501} = 0,12 \text{ MN}$ a $F_{Y1.0501} = 0,13 \text{ MN}$, $F_{X1.7242} = 0,11 \text{ MN}$ a $F_{Y1.7242} = 0,13 \text{ MN}$. Vodící kladka č. 1 (graf č. 3, 4) byla zatěžována namáháním o maximální hodnotě $F_{Y1.0501} = 3,04 \text{ MN}$ a $F_{Y1.7242} = 3,08 \text{ MN}$ a vodící kladka č. 2 (graf č. 5, 6) maximálními silami $F_{Y1.0501} = 3,13 \text{ MN}$ a $F_{Y1.7242} = 3,33 \text{ MN}$.

6 Použitá literatura

- [1] ČADA, R. *Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody tváření, plošná tvářitelnost (návody do cvičení): skriptum*. 1.vyd. Ostrava: VŠB-TUO, 2002, 148 s. ISBN 80-248-0019-5.
- [2] LENFELD, P. *Technologie II-tváření kovů* [online]. 2012 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z URL: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekcce/01.htm>
- [3] PETRUŽELKA, J., SONNEK, P. *Analýza procesu tváření za tepla : Dynamický materiálový model*. Frýdek - Místek : VŠB-TUO, katedra mechanické technologie, 2001. 160 s. ISBN 80-248-0035 -7.
- [4] ČERNOCH, S. *Strojně technická příručka*. 13.vyd. Praha: SNTL, 1977, 2568 s. L13-E1-IV-51/22568
- [5] VÍTEK, A. *Ohýbání trubek*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. 159 s.
- [6] ČABELKA, J. a kol, *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. 160 s.
- [7] JINPO - *Stroj pro ohýbání trubek s indukčním ohřevem SOT 530*. [online]. [cit. 2011-11-23]. Dostupné z URL: <<http://www.jinpoplus.cz/>>
- [8] MODŘANY Power a. s., *Ohýbání*, 2012 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z URL: <<http://www.modrany.cz/>>

- [9] HBS, Hines Bending Systems, Inc. *Basic tube bending guide* [online]. 2012 [cit. 2012-03-08] Dostupné z URL: <[http:// www.hinesbending.com](http://www.hinesbending.com)>
- [10] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [11] DVOŘÁK, M. a kol, *Technologie II*. 3. vyd. Brno: CERM, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [12] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [13] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB-TU, 1979, 137 s.
- [14] HRUBÝ, J. *Silové poměry při ohýbání trubek v kladkové ohýbačce – analytická zpráva*, 2006, 34 s.
- [15] 4WELD, *Ekvivalenty ocelí - 4WELD*. 2012 [cit. 2012-03-08]. Dostupné z URL: <<http://www.ocele.4weld.sk/>>
- [16] SMRČEK, J. *Návrh technologie výroby výtažku z plechu s využitím MKP: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 58 s. Vedoucí práce: Čada, R.
- [17] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.